Guia do Usuário

DRL

Distribuição e Recuperação de LNAPL

Autores

Eng. Dr. André Moreira de Souza Filho
PETROBRAS/CENPES

Eng. Dr. Marcio R. Schneider
UFSC/REMA

Eng. Dr. Admir José Giachini
UFSC/REMA

Eng.ª Eduarda Gabriele R. Rudek
UFSC/REMA

Eng.ª Dra. Ana Claudia Canalli Bortolassi
UFSC/REMA

Eng. Gusttav Bauermann Lang
UFSC/REMA

Bel. Vanderval Borges de Souza Junior
UFSC/REMA

Organizadoras: **Bolsistas de Inovação Tecnológica**

Amanda Rafaella Campos | Giovanna Viana Pitoli | Isabelle França
Julia Viel Vitali | Letícia Marianne Costa | Mayara Dargas Sousa

PETROBRAS | anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis | UFSC | rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE | Atena Editora

Ano 2024

Guia do Usuário

DRL

Distribuição e Recuperação de LNAPL

Autores

Eng. Dr. André Moreira de Souza Filho
PETROBRAS/CENPES

Eng. Dr. Marcio R. Schneider
UFSC/REMA

Eng. Dr. Admir José Giachini
UFSC/REMA

Eng.ª Eduarda Gabriele R. Rudek
UFSC/REMA

Eng.ª Dra. Ana Claudia Canalli Bortolassi
UFSC/REMA

Eng. Gusttav Bauermann Lang
UFSC/REMA

Bel. Vanderval Borges de Souza Junior
UFSC/REMA

Organizadoras: **Bolsistas de Inovação Tecnológica**

Amanda Rafaella Campos | Giovanna Viana Pitoli | Isabelle França
Julia Viel Vitali | Letícia Marianne Costa | Mayara Dargas Sousa

PETROBRAS | anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis | UFSC | rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE | Atena Editora

Ano 2024

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Thamires Camili Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Guia do usuário
DRL – Distribuição e recuperação de LNAPL

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Jeniffer dos Santos
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G943 Guia do usuário DRL – Distribuição e recuperação de LNAPL / Organizadoras Amanda Rafaella Campos, Giovanna Viana Pitoli, Isabelle França, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.

Outras organizadoras:
Julia Viel Vitali
Letícia Marianne Costa
Mayara Dargas Sousa

Autores:
André Moreira de Souza Filho
Marcio Roberto Schneider
Admir José Giachini
Eduarda Gabriele Ramser Rudek
Ana Claudia Canalli Bortolassi
Gusttav Bauermann Lang
Vanderval Borges de Souza Junior

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-2931-9
DOI https://doi.org/10.22533/at.ed.319242012

1. Engenharia de Software. I. Campos, Amanda Rafaella (Organizadora). II. Pitoli, Giovanna Viana (Organizadora). III. França, Isabelle (Organizadora). IV. Título.
CDD 005.2

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Para fins desta declaração, o termo 'autor' será utilizado de forma neutra, sem distinção de gênero ou número, salvo indicação em contrário. Da mesma forma, o termo 'obra' refere-se a qualquer versão ou formato da criação literária, incluindo, mas não se limitando a artigos, e-books, conteúdos on-line, acesso aberto, impressos e/ou comercializados, independentemente do número de títulos ou volumes. O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação à obra publicada; 2. Declara que participou ativamente da elaboração da obra, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final da obra para submissão; 3. Certifica que a obra publicada está completamente isenta de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

AGRADECIMENTOS

Queremos registrar aqui nossos mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para tornar este projeto realidade. O sucesso deste livro deve-se inteiramente à colaboração, ao apoio e à dedicação de pessoas que foram essenciais para sua realização.

Ao Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil (in memoriam), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que iniciou os primeiros estudos sobre a contaminação de solos e águas subterrâneas e contribuiu muito com os avanços tecnológicos na área.

Ao corpo gerencial e técnico da Petrobras, André Bueno Portes, Bruno Pereira Faria, Camila Tolledo Santos, Flavia Goncalves de Castro, Flavio Barbosa Bezerra, Marco Antonio Batista da Silva, Ricardo Schutz, Rodrigo Augusto Marques, Adriana Ururahy Soriano, Deivid Lucas dos Santos Migueleti, Leonardo Mitidiero Mansor, Leonardo Vieira Gomes da Silva, Luiz Fernando Martins, Marcelo Bizzoni, Marcus Paulus Martins Baessa e Tiago Magalhaes Soares, pelo apoio ao desenvolvimento e aplicação do software SUITE. Além disso, por compartilhar conhecimento e dados relevantes utilizados na simulação dos estudos de caso.

À Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo apoio à pesquisa científica e incentivo à aplicação de tecnologias de inovação na indústria de petróleo, gás natural e combustível.

Aos pesquisadores, professores, técnicos e bolsistas de inovação tecnológica do Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente (REMA), em especial ao Prof. Dr. Admir José Giachini (Coordenador do Projeto) e às colaboradoras Amanda Rafaella Campos, Giovanna Viana Pitoli, Isabelle França, Julia Viel Vitali, Letícia Marianne Costa e Mayara Dargas Sousa, que se dedicaram a esse projeto.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

O problema ocasionado pelos vazamentos acidentais de petróleo, derivados e biocombustíveis em ambientes terrestres (*onshore*) resulta em impactos ambientais e à saúde humana. Além dos impactos, há o custo contínuo de milhões de reais por ano em ações de gerenciamento de áreas contaminadas visando à mitigação dos danos dos vazamentos, as multas ambientais e os contenciosos jurídicos. Um dos principais fatores limitantes do encerramento de casos de vazamentos é a ocorrência persistente de hidrocarbonetos de petróleo no solo e aquíferos como substância imiscível menos densa que a água (LNAPL – *Light Nonaqueous Phase Liquid*). De senso comum, o LNAPL é percebido como uma ameaça ambiental devido aos riscos potenciais de explosão, toxicidade, mobilidade e a possibilidade de gerar plumas de contaminação dissolvidas nas águas e no ar, com potencial para atingir receptores afastados da fonte de contaminação.

A recuperação do LNAPL em áreas contaminadas é uma atividade que exige experiência e conhecimento técnico na elaboração e execução dos projetos de remediação. Em comparação com os eventos de explotação de petróleo em áreas de produção onde, menos de 40% do óleo presente no reservatório é explotado, a eficiência da recuperação do LNAPL em áreas contaminadas também é baixa. A alta complexidade do comportamento do LNAPL no solo e a ausência de modelos matemáticos integrados de apoio à tomada de decisão têm levado à compreensão inadequada dos cenários de contaminação, resultando na adoção de estratégias de remediação sem eficácia e intermináveis, gerando custos que poderiam ser evitados.

O *software* DRL – Distribuição e Recuperação de LNAPL foi desenvolvido com o propósito de auxiliar especialistas em remediação na determinação de parâmetros quantitativos que balizem as ações de recuperação dos hidrocarbonetos de petróleo em fase pura. Com o *software* é possível determinar os volumes de LNAPL recuperáveis, residuais e específicos. Além disso, permite simular a transmissividade do produto em fase pura e técnicas de recuperação hidráulica e pneumática do LNAPL (ex. bombeamento, *skimming*, *vacuum enhanced* e trincheira). O conjunto de resultados fornecidos pelo modelo podem fornecer uma visão completa de até onde as técnicas de remediação são suficientemente eficientes e aplicáveis, em um contexto de encadeamento (combinação) das diversas ações de remediação.

Praticamente, existe um único *software* disponível no mercado internacional comparável com o DRL. Em uma análise comparativa do DRL em relação ao *software* LDRM (CHARBENEAU, 2007) da American *Petroleum Institute* (API), destacam-se os principais diferenciais do DRL:

- Implementação de dois modelos de distribuição de LNAPL (Jeong e Charbeneau (2014) e Lenhard, Rayner e Davis (2017), sendo que o segundo modelo implementado considera a variação do nível d'água subterrânea, ou seja, o efeito do trapeamento do LNAPL;

- Utilização de métodos de integração numérica mais robustos, reduzindo os erros de aproximação;
- Simulação de uma rede de poços de monitoramento de LNAPL, simultaneamente, considerando até 5 (cinco) camadas de solo heterogêneas; e
- Exportação de arquivos com extensão *.csv* para aplicação em ferramentas de geoprocessamento (ArqGIS ou QGIS).

1.1 O que é o DRL?

O DRL permite o refinamento do modelo conceitual da área contaminada por meio da simulação de parâmetros relativos à distribuição de LNAPL, como as saturações e os volumes, além da verificação da eficiência de remoção do contaminante por métodos hidráulicos e pneumáticos. Deve ser aplicado após a etapa de investigação detalhada, visto que é necessário conhecer as características do meio contaminado e da fonte de contaminação.

No contexto do gerenciamento de áreas contaminadas estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009, o *software* DRL foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

a) Quantificar o volume total de LNAPL no meio poroso, a saturação, os volumes móveis e residuais;

b) Quantificar a permeabilidade e transmissividade do LNAPL com base nas características do fluído e do meio poroso; e

c) Simular a remoção de LNAPL por meio de métodos hidráulicos, de forma a embasar a elaboração de projetos de remediação.

1.2 Funcionalidades do DRL

As principais funcionalidades do DRL incluem:

- Quantificação das saturações e volumes específicos total, livre, residual e trapeado de LNAPL;
- Simulação da distribuição de LNAPL com os modelos de Jeong e Charbeneau (2014) para o LNAPL livre, e Lenhard, Rayner e Davis (2017) para o LNAPL trapeado;
- Quantificação da transmissividade do produto em função da espessura de fase livre nos poços de monitoramento;
- Simulação da recuperação de LNAPL com as técnicas *Skimming, Water Enhanced, Vacuum Enhanced* e trincheiras;
- Determinação do volume de óleo recuperado e espessura de LNAPL no poço por tempo de atuação da técnica de extração;

- Simulação da eficiência das técnicas de remediação, projetando o tempo de aplicação em função da hidrogeologia, reologia do LNAPL e resultados de testes pilotos; e
- Auxílio na definição da técnica de extração hidráulica e/ou pneumática mais eficiente para o cenário de contaminação.

1.3 Requisitos mínimos do sistema

- Windows 10;
- 8GB de RAM (mínimo), 16GB (recomendado);
- Intel Core i3 (mínimo), Intel Core i7 (recomendado);
- Processador Gráfico: 1024x768 (mínimo), Full HD (recomendado).

2 UTILIZANDO O DRL

2.1 Inicialização do SUITE e seleção do banco de dados

Após clicar duas vezes no ícone de inicialização do *software* SUITE, uma janela é apresentada conforme a Figura 2.1. Estão disponíveis as opções “Carregar banco de dados existente” ou criar um “Novo banco de dados”. Caso seja a primeira vez utilizando o SUITE, o usuário deve selecionar a opção “Novo banco de dados”. Após, uma janela será apresentada para escolha do local onde o banco de dados será salvo. Ao selecionar a pasta desejada, clique em “Salvar” para criar um arquivo de extensão “*.db”*



Figura 2.1. Seleção do banco de dados

O arquivo *.db* é responsável por armazenar todas as informações referentes às simulações realizadas, incluindo dados dos solos e produtos utilizados. Este arquivo pode ser compartilhado, conforme mais detalhes apresentados no Item 3.1. Após criar e salvar o arquivo *.db*, uma mensagem é apresentada na tela (Figura 2.2).

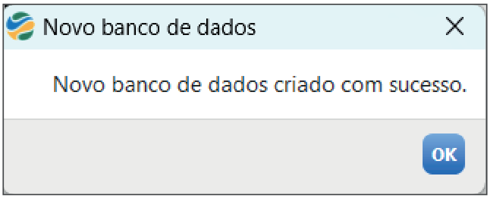


Figura 2.2. Novo banco de dados criado com sucesso

Ao criar o banco de dados, o usuário pode selecionar a inserção de valores padrão para o novo banco de dados, visando adicionar informações básicas de solos e produtos conhecidos pela literatura, conforme a Figura 2.3.

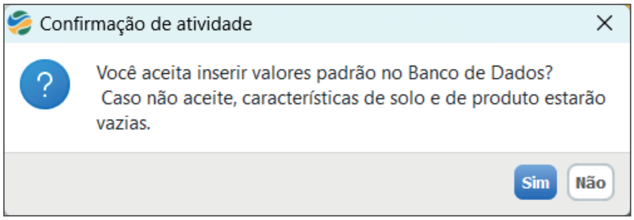


Figura 2.3. Inserir valores padrão no banco de dados

Caso o usuário já tenha criado um banco de dados previamente ou deseje utilizar um banco de dados fornecido, basta selecionar a opção "Carregar Banco de dados existente" (Figura 2.1). Uma janela será apresentada para seleção do arquivo *.db*. Se o banco de dados for carregado corretamente, uma mensagem será apresentada na tela (Figura 2.4).

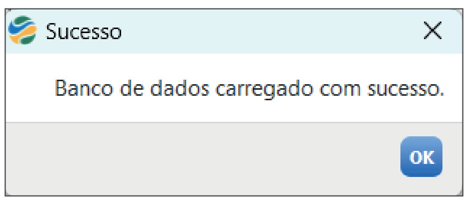


Figura 2.4. Banco de dados carregado com sucesso

Para mais informações sobre como os projetos são salvos no banco de dados e como compartilhá-los, consulte o Item 3.1. A seleção do banco de dados é um procedimento padrão, que sempre deve ser realizado ao inicializar o SUITE.

2.2 Nova simulação

Para iniciar uma nova simulação, o usuário deve selecionar o ícone "Distribuição e Recuperação do LNAPL – DRL" na tela inicial (Figura 2.5). Ou, então, clicar no ícone "Novo", localizado abaixo do menu "Arquivo" na aba superior (Figura 2.5). Também é possível iniciar uma nova simulação selecionando "Arquivo → Novo", como indicado na Figura 2.6. O menu "Arquivo" possui outros comandos, como abrir uma simulação já realizada e salvar as mudanças efetuadas durante o processo.

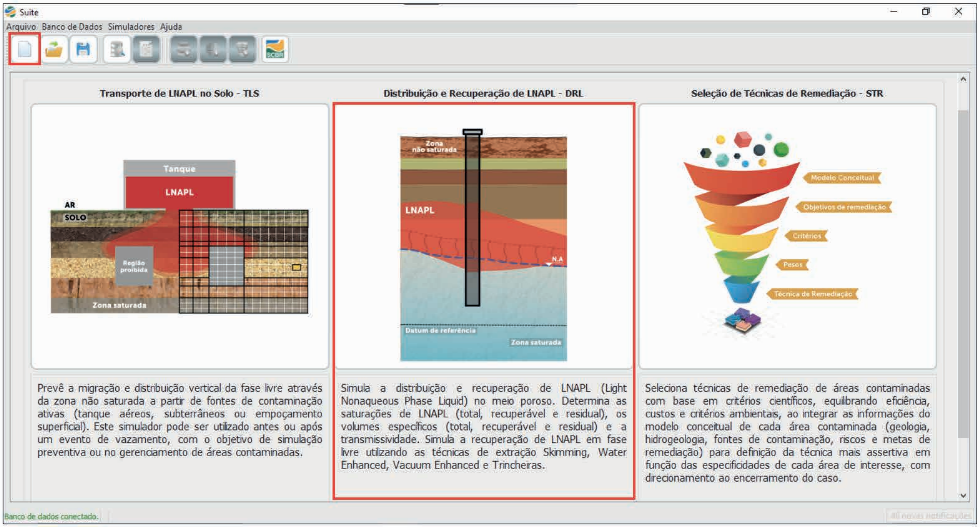


Figura 2.5. Área de trabalho inicial da SUITE de simuladores

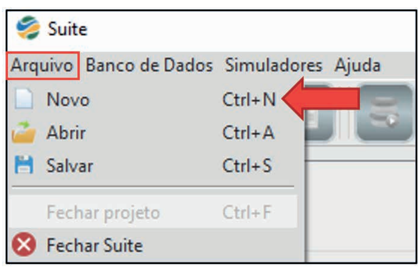


Figura 2.6. Clique em “Arquivo” e “Novo” para iniciar um novo projeto

Ao selecionar uma destas opções, uma nova janela é aberta, permitindo a seleção de um dos três simuladores que compõem o SUITE. Para criar um novo projeto, basta selecionar a opção “DLR” e clicar em “Criar”, conforme indicado na Figura 2.7. A interface inicial do DRL é apresentada na Figura 2.8.

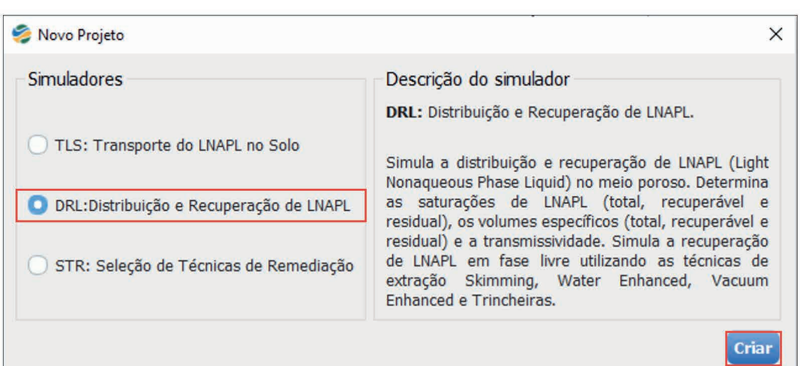


Figura 2.7. Janela para escolher o simulador utilizado. Clique em “DRL”

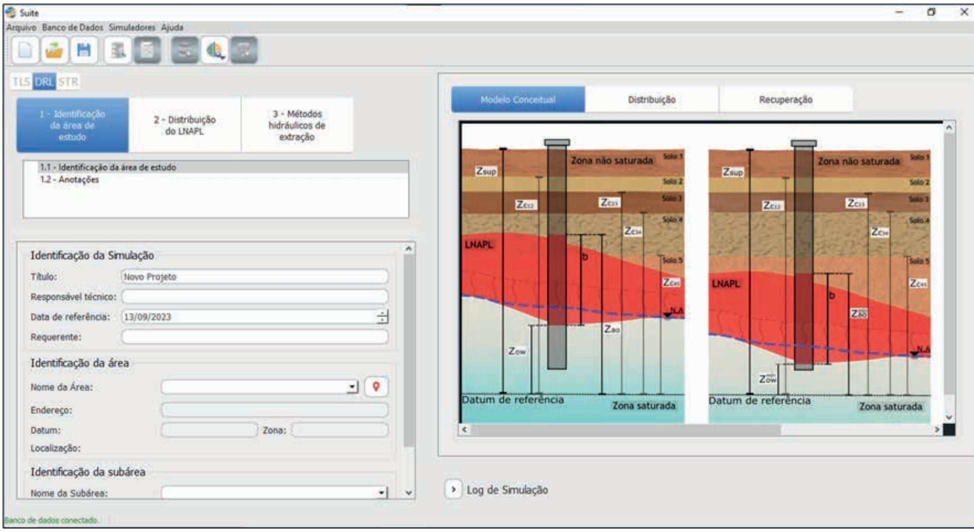


Figura 2.8. Interface inicial do DRL

Para abrir uma simulação salva anteriormente, o usuário deve clicar no ícone “Abrir”, abaixo do menu “Arquivo”, como indicado na Figura 2.9. Ou, então, basta ir em “Arquivo → Abrir” como indicado na Figura 2.10.



Figura 2.9. Ícone para abrir um projeto

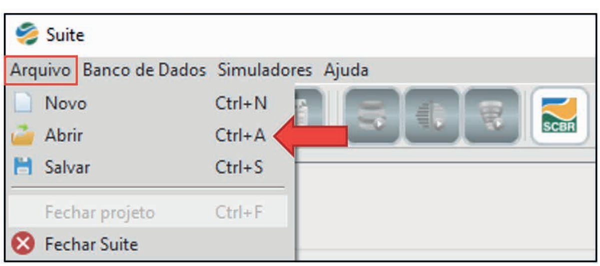


Figura 2.10. Abrir projeto pela barra de menus

Ao selecionar uma destas opções, é possível visualizar todos os projetos salvos no SUITE. Para abrir um projeto no DRL, basta selecionar o projeto de interesse e clicar em “Abrir”, conforme indicado na Figura 2.11.

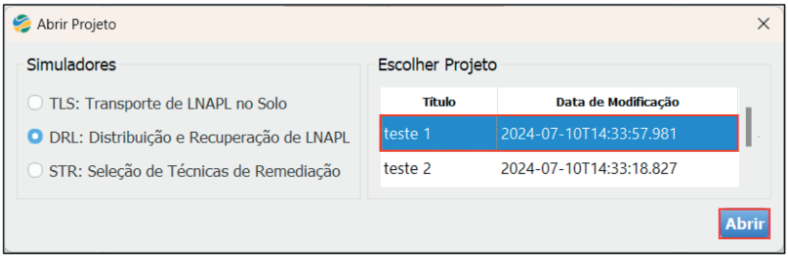


Figura 2.11. Abrir um projeto já salvo no SUITE

2.3 Banco de dados

O item "Banco de Dados", apresentado na barra de menus (Figura 2.12), compila informações pertinentes sobre tipos de solos e produtos que foram previamente cadastrados. Para verificar os parâmetros que estão cadastrados, basta clicar sobre a aba "Banco de Dados" e, posteriormente, em "Abrir Banco de Dados TLS e DRL". O banco de dados é apresentado conforme Figura 2.13.

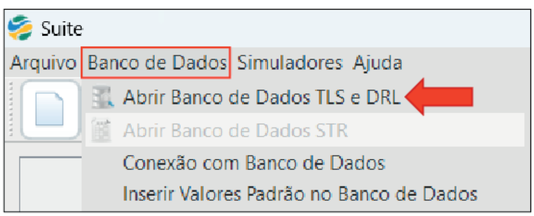


Figura 2.12. Abrir banco de dados

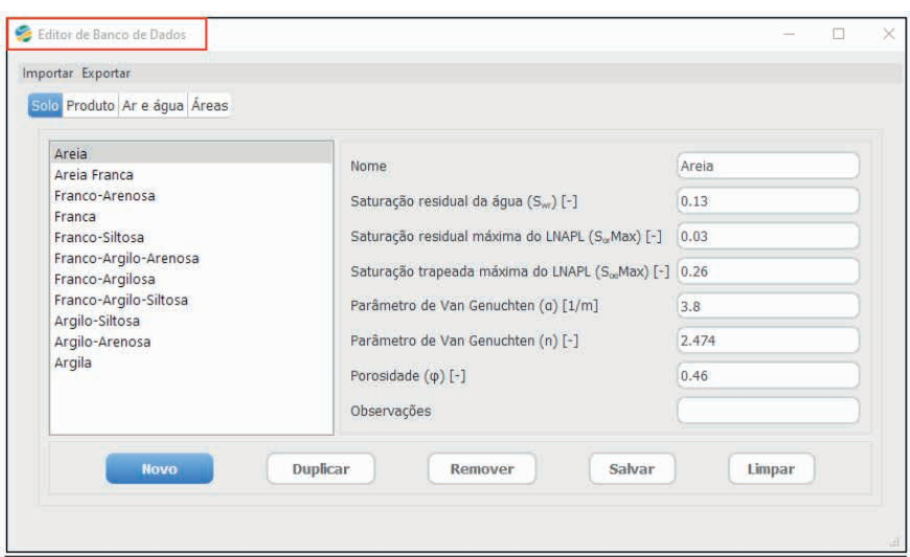


Figura 2.13. Interface do banco de dados

2.3.1 Cadastro de novo solo ou produto

Para cadastrar um novo solo/produto não contemplado no banco de dados, basta clicar em "Novo" no "Editor de Banco de Dados" (Figura 2.14). Na sequência, é possível inserir os dados solicitados referentes ao solo ou produto que se deseja cadastrar. Também é permitido remover um solo/produto já cadastrado ou adicionar um solo/produto com as mesmas características já cadastradas, ao clicar em "Duplicar" (Figura 2.15). Antes de fechar a janela, clique em "Salvar".

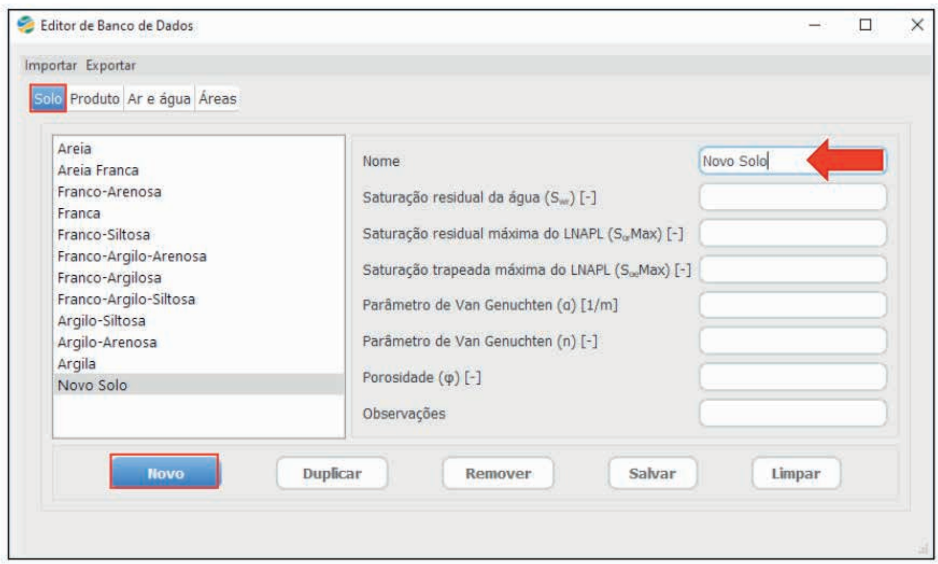


Figura 2.14. Inserir novo tipo de solo no banco de dados

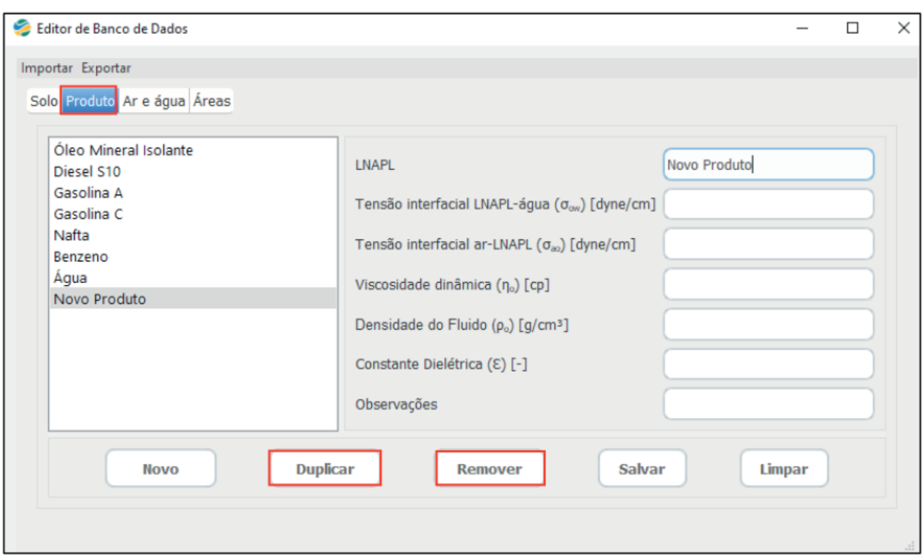


Figura 2.15. Duplicar ou remover contaminante no banco de dados

Outra forma de cadastrar um novo solo/produto é através da importação de um arquivo em formato *.csv*.. Para obter o *template* de importação, basta selecionar a opção "Exportar" na parte superior da aba do banco dados e escolher "Exportar ⟶ *Template* de Solos ou Produtos" (Figura 2.16). Também é possível exportar todos os solos/produtos já cadastrados no banco de dados, como indicado na Figura 2.16.

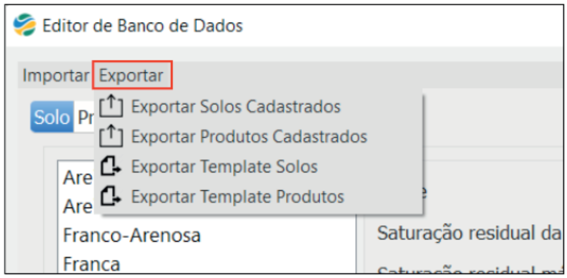


Figura 2.16. Exportar *template* e dados cadastrados

Após preencher os dados solicitados no *template,* é possível importá-lo selecionando a opção "Importar → Solo ou Produto" (Figura 2.17). Se a importação for bem-sucedida, uma mensagem indicando que o solo ou produto foi importado com sucesso aparecerá em sua tela. Caso a importação não seja bem-sucedida, consulte o Item 3.8. Esta opção é útil para a inserção de múltiplos solos/produtos de forma rápida e eficiente.

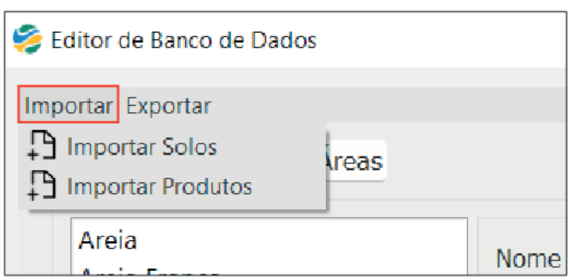


Figura 2.17. Importar *template* no formato *.csv*

Além de informações a respeito do tipo de solo e produto, o banco de dados contém parâmetros padrão referentes ao ar e água e também sobre as áreas cadastradas (Figura 2.18).

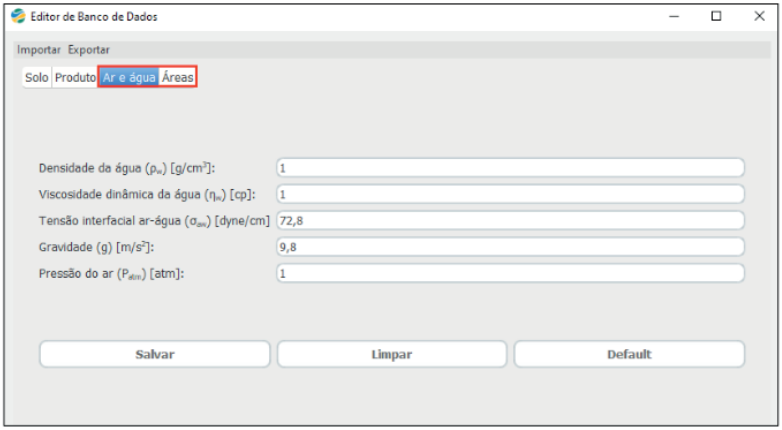


Figura 2.18. Informações padrão de “Ar e Água” no banco de dados

2.3.2 Cadastro de novas áreas e subáreas

Ainda em “Editor de Banco de Dados”, para cadastrar áreas e subáreas de estudo basta clicar em “Áreas ⟶ Novo” (Figura 2.19). É necessário adicionar o link de geolocalização da área de interesse ou as coordenadas geográficas. Como exemplo, é sugerida a utilização do *Google Earth* (versão web), conforme apresentado na Figura 2.20. Contudo, outros links, tal como a *homepage* do projeto, também podem ser inseridos. Para visualizar o link de referência, copie-o e cole no navegador *web*. Após o preenchimento desses dados, clique em “Salvar”.

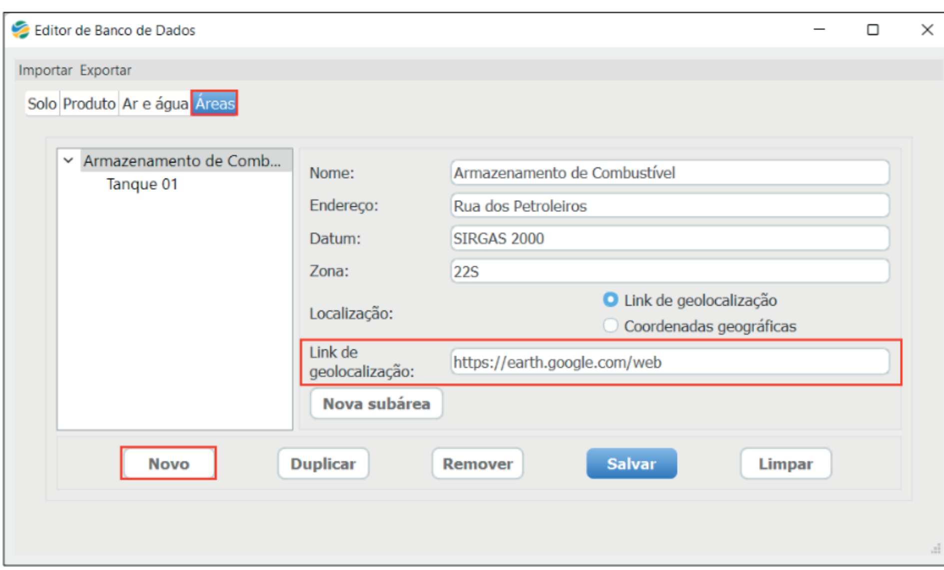


Figura 2.19. Cadastro de nova área

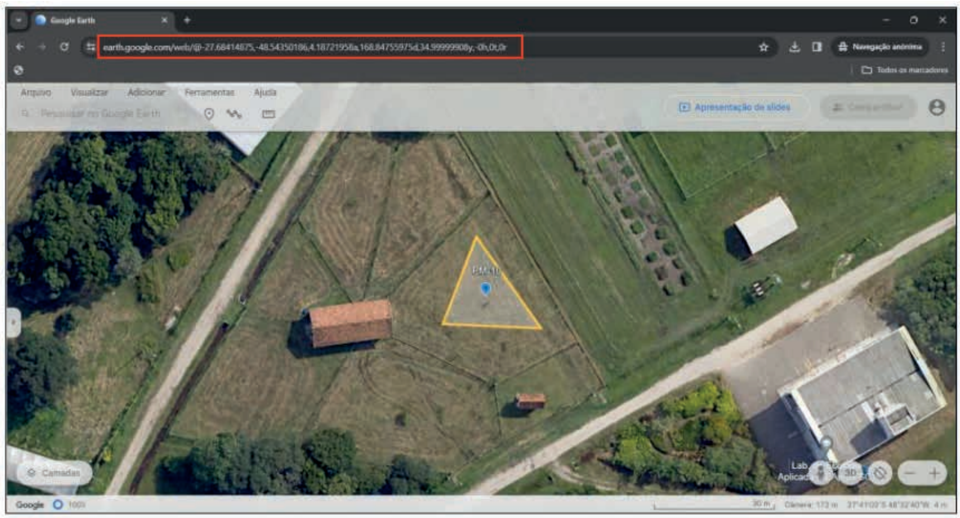


Figura 2.20. Link de geolocalização do *Google Earth* do ponto de referência

2.4 Área de trabalho do DRL

A área de trabalho do DRL está organizada conforme indicado na Figura 2.21. O DRL é formado por duas áreas principais: Área 1 e Área 2, nas quais as funcionalidades de ambas são descritas a seguir.

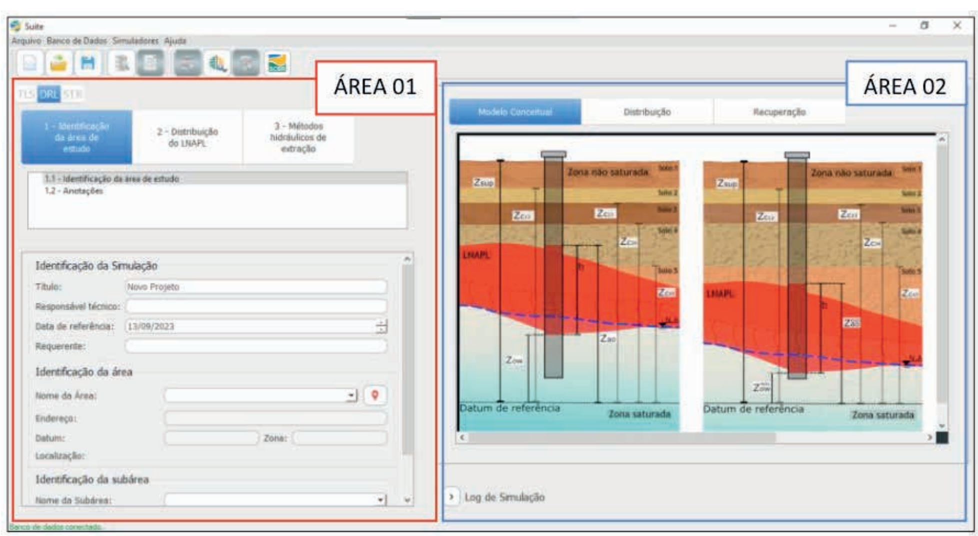


Figura 2.21. Área de trabalho do DRL

<u>Área 1:</u> Local onde são inseridos os dados de entrada e onde ocorrem as etapas da simulação (Figura 2.22).

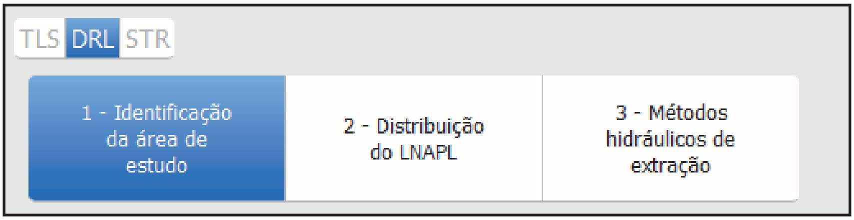


Figura 2.22. Área 1 – Etapas da simulação

- <u>1 – Identificação da área de estudo:</u> Tem a finalidade de armazenar dados de identificação das áreas e subáreas de estudo, como nome e localização. Além disso, é possível inserir dados de identificação da simulação, como o título do projeto e o responsável técnico.
- <u>2 – Distribuição do LNAPL</u>: Etapa onde deve ser selecionada a metodologia de distribuição do LNAPL, além do cadastro dos poços de monitoramento e inserção das características do modelo conceitual (tipo de solo e caracterização do produto).
- <u>3 – Métodos hidráulicos de extração:</u> Etapa onde o método de extração é selecionado para a simulação da recuperação do produto.

<u>Área 2:</u> Onde são apresentados e os resultados da simulação e informações auxiliares (Figura 2.23).

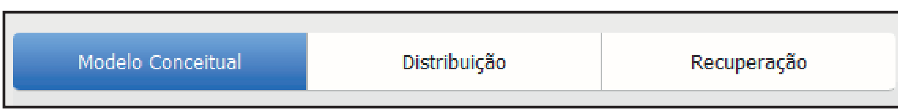


Figura 2.23. Área 2 - Resultados

- <u>Modelo conceitual:</u> Apresenta uma figura para auxiliar o usuário na identificação dos dados de elevações dos poços de monitoramento. As figuras são atualizadas de acordo com a metodologia de distribuição selecionada.
- <u>Distribuição:</u> Apresenta os resultados de saturações, transmissividade e volumes obtidos através da simulação da distribuição do LNAPL nos poços cadastrados (conforme a metodologia selecionada).
- <u>Recuperação:</u> Apresenta os resultados de volume e vazão de recuperação do LNAPL para os poços cadastrados, além da variação da espessura de LNAPL.

Acima da área de trabalho se encontra a barra de menus e barra de ícones de atalho, conforme a Figura 2.24 e Figura 2.25.

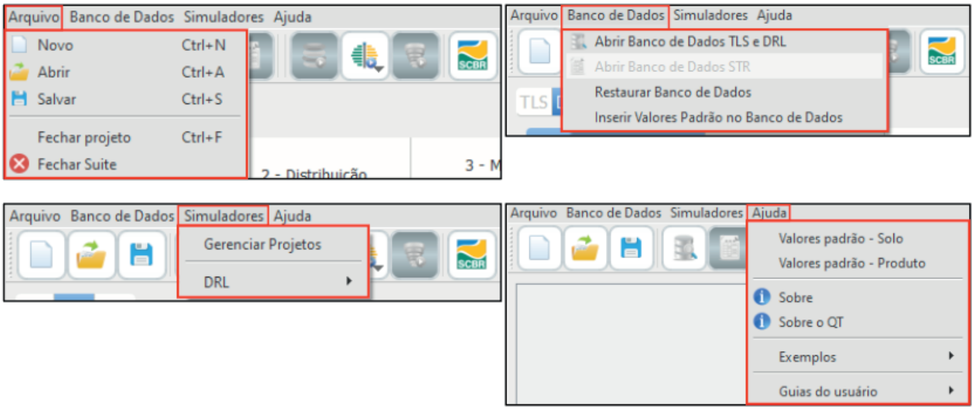


Figura 2.24. Opções da barra de menus

As principais funcionalidades da barra de menus incluem:

1. “Arquivo”:

   a. Novo: cria um novo projeto;

   b. Abrir: abre um projeto existente;

   c. Salvar: salva o projeto atual;

   d. Fechar projeto: fecha o projeto atual e retorna para a interface inicial do SUITE;

   e. Fechar SUITE: fecha o *software* SUITE;

2. “Banco de Dados”:

   a. Abrir Banco de Dados TLS e DRL: Abre o banco de dados de solos e produtos cadastrados;

   b. Abrir Banco de Dados STR: Abre o banco de dados de técnicas de remediação;

   c. Restaurar Banco de Dados: Restaura o banco de dados para a versão inicial;

   d. Inserir valores padrão no Banco de Dados: Insere os valores de solos e produtos padrão do SUITE;

3. “Simuladores”:

   a. Gerenciar projetos: Permite a exclusão de projetos e/ou edição de informações;

   b. DRL: Permite exportar os resultados das simulações do DRL;

4. “Ajuda”:

   a. Valores padrão – Solo: Apresenta um documento com informações de valores de referência para solos;

   b. Valores padrão – Produto: Apresenta um documento com informações de valores de referência para produtos;

c. Sobre: Apresenta informações sobre a versão do *software* e contatos;

d. Sobre o QT: Apresenta informações sobre a biblioteca de programação utilizada;

e. Exemplos: Dá acesso a exemplos hipotéticos para cada simulador (TLS, DRL e STR);

f. Guias do usuário: Dá acesso aos documentos dos guias do usuário de cada *software* (TLS, DRL e STR).

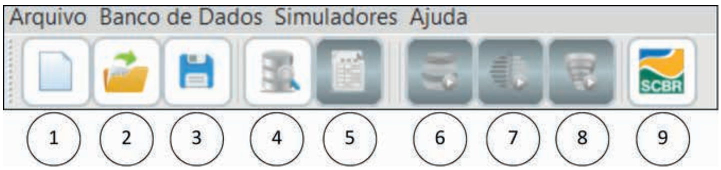


Figura 2.25. Barra de menus e barra de ícones de atalho

As principais funcionalidades da barra ícones de atalho são:

1. Novo: Cria um novo projeto (TLS, DRL ou STR) em branco para o usuário começar a trabalhar;

2. Abrir: Abre um projeto existente (TLS, DRL ou STR), permitindo ao usuário visualizar e editar seu conteúdo;

3. Salvar: Salva o projeto atual, gravando as alterações feitas;

4. Editor de Banco de Dados TLS e DRL: Abre o Editor de Banco de Dados do TLS e DRL, permitindo a visualização e alteração dos valores de solos, produtos e áreas cadastradas. Esse ícone só fica ativo quando um projeto do TLS ou DRL está em andamento;

5. Banco de Dados STR: Abre o Banco de Dados do STR, permitindo a visualização das técnicas de remediação disponíveis e seus parâmetros considerados. Esse ícone só fica ativo quando um projeto do STR está em andamento;

6. Executar TLS: Executa a simulação dos dados de entrada informados no TLS e apresenta os resultados simulados;

7. Executar DRL: Executa a simulação dos dados de entrada informados no DRL e apresenta os resultados simulados;

8. Executar STR: Executa a simulação dos dados de entrada informados no STR e apresenta os resultados simulados;

9. SCBR: Inicia a aplicação do *software* Solução Corretiva Baseada no Risco (SCBR). Para essa função é necessário ter a ferramenta instalada em seu computador e selecionar o caminho que a aplicação se encontra. O caminho padrão é *C:\Program Files (x86)\ Petrobras\ SCBR 3.25.0*

2.5 Etapas da simulação

O DRL contempla quatro etapas de simulação que podem ser observadas na Figura 2.26 e são discutidas com mais detalhes a seguir.

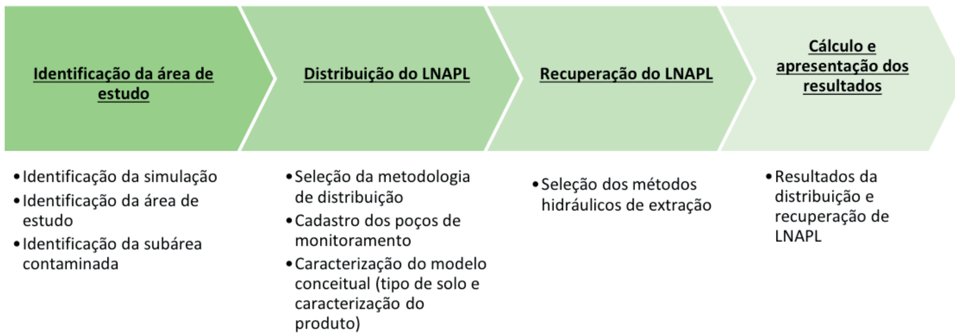


Figura 2.26. Etapas da simulação no DRL

2.6 Identificação da área de estudo

A primeira etapa da simulação com o DRL consiste na identificação da área de estudo. Para isso, selecione a aba “1 – Identificação da área de estudo” localizada no canto superior esquerdo (Figura 2.27).

Nesta etapa, devem ser preenchidas informações a respeito da simulação, como o título do projeto, o responsável técnico e a localização da área e da subárea (se houver). No item “Identificação da Área → Nome da Área”, podem ser selecionadas as áreas de estudo previamente cadastradas no banco de dados, ao clicar na seta localizada no canto direito (Figura 2.27). Também é possível clicar no ícone de localização e efetuar um novo cadastro de área e subáreas no banco de dados.

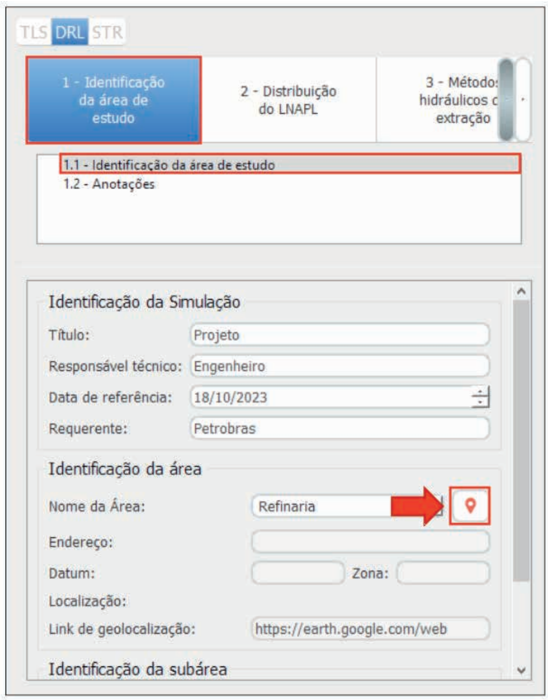


Figura 2.27. Identificação da área de estudo

O campo “Anotações” permite que o usuário insira informações úteis à simulação, para posterior consulta (Figura 2.28).

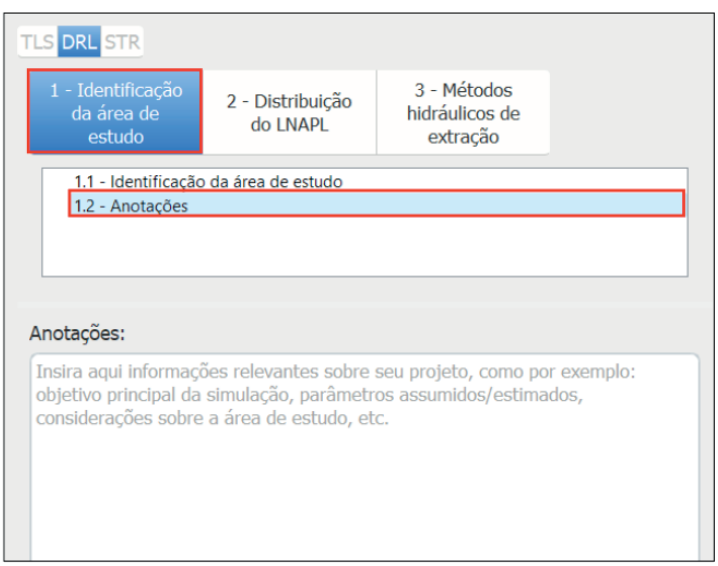


Figura 2.28. Campo para anotações

2.7 Distribuição de LNAPL

Após a identificação da área de estudo, a próxima etapa da simulação contempla a distribuição de LNAPL. Ao clicar na aba “2 - Distribuição do LNAPL” (Figura 2.29), tem-se três opções: 2.1 - Escolha da Metodologia de Cálculo para a Distribuição do LNAPL, 2.2 - Cadastro dos Poços de Monitoramento e 2.3 -Visualização da rede de poços de monitoramento previamente cadastrados.

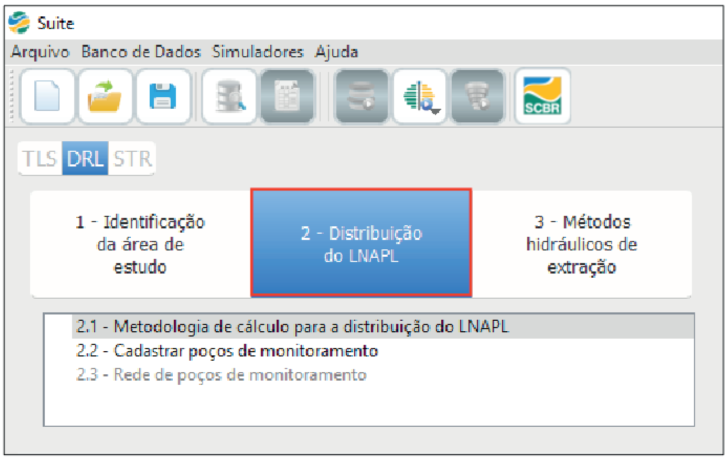


Figura 2.29. Distribuição do LNAPL

2.7.1 Metodologia de cálculo para distribuição do LNAPL

Para calcular a distribuição do LNAPL, é necessário selecionar a metodologia de cálculo. Estão disponíveis duas metodologias: o modelo de Lenhard, Rayner e Davis (2017) e o modelo de Jeong e Charbeneau (2014). A escolha da metodologia deve ser realizada de acordo com o modelo conceitual da área de estudo e informações disponíveis. Para mais informações, consulte o Item 3.3.

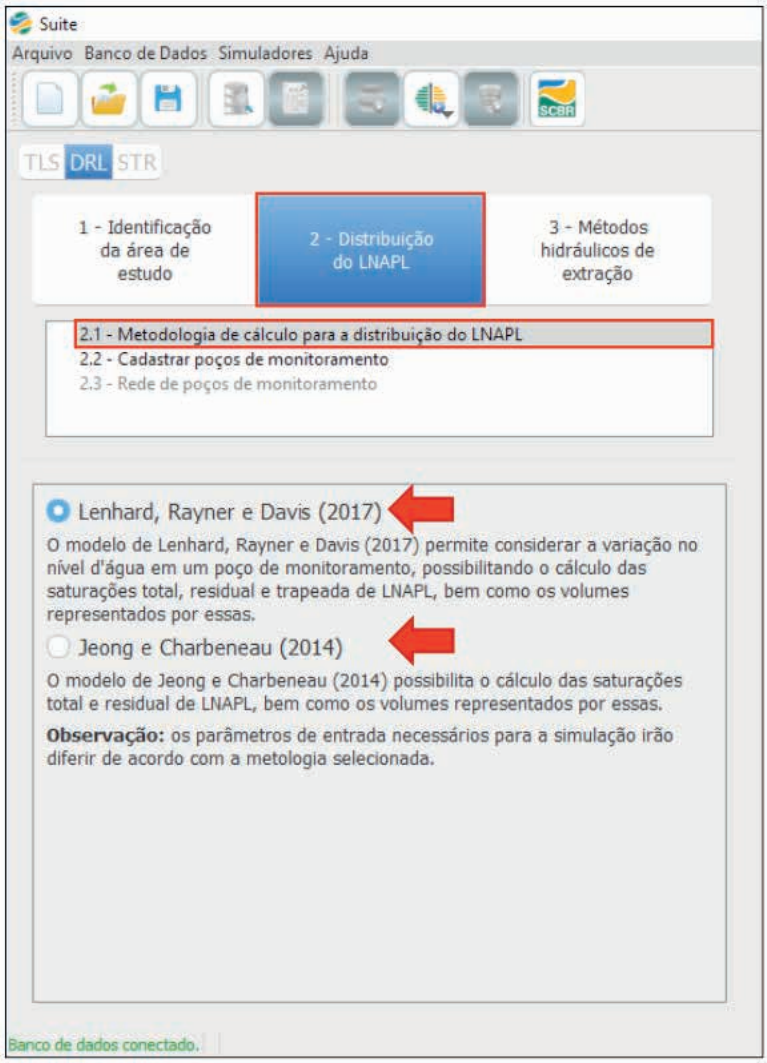


Figura 2.30. Seleção da metodologia para cálculo da distribuição do LNAPL

2.7.2 Cadastro dos poços de monitoramento

O cadastro dos poços de monitoramento pode ser realizado de forma individual ou através da importação dos dados de entrada a partir de uma planilha eletrônica em formato *.csv*.

Para cadastrar os poços de forma individual, deve-se clicar em "Adicionar poço individualmente" (Figura 2.31). Para importar os dados através de um arquivo *.csv,* basta selecionar a opção "Exportar *template csv*" e preencher os dados requeridos (Figura 2.31). Após o preenchimento, deve-se clicar em "Importar arquivo *csv*" e selecionar o *template* preenchido. Os dados de entrada do *template* variam de acordo com a metodologia de

distribuição de LNAPL selecionada, para mais informações sobre o cadastro de poços via *template* no formato.*csv,* consulte o Item 3.7.

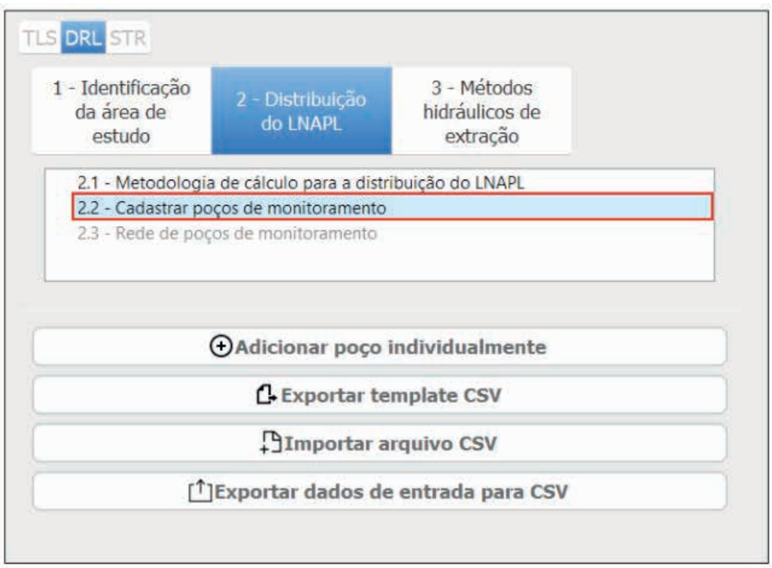


Figura 2.31. Cadastrar poços de monitoramento

Os dados para cadastro dos poços de monitoramento contemplam: **Nome e coordenadas geográficas, Dados de monitoramento, Caracterização do contaminante e Caracterização do meio poroso**. A seguir, são apresentados mais detalhes a respeito das informações necessárias.

- **Nome e coordenadas geográficas**

O nome e as coordenadas geográficas são necessários para a identificação e localização dos poços na área de estudo, não sendo permitido que poços diferentes tenham o mesmo nome de identificação. As coordenadas geográficas não são de preenchimento obrigatório.

- **Dados de monitoramento**

Essas informações variam de acordo com a metodologia de distribuição selecionada (Lenhard ou Charbeneau), conforme indicado na Figura 2.32.

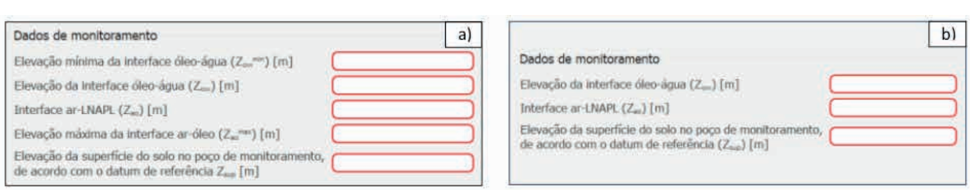


Figura 2.32. Dados de monitoramento requeridos. a) Modelo de Lenhard, Rayner e Davis (2017). b) modelo de Jeong e Charbeneau (2014)

Para auxiliar o usuário a identificar as elevações dos poços, a interface apresenta na Área 2 um modelo conceitual gráfico que exemplifica como é feita a definição das elevações. Para mais informações sobre as elevações que devem ser inseridas, consulte o Item 3.5.

Na Figura 2.33, são apresentados campos em vermelho no item "Dados de Monitoramento". Isso ocorre, pois os dados inseridos estão fora dos limites aceitáveis estabelecidos ou não foram inseridos e são essenciais para a simulação. Ao deixar o cursor do *mouse* sobre o local de preenchimento, uma janela informa os limites permitidos.

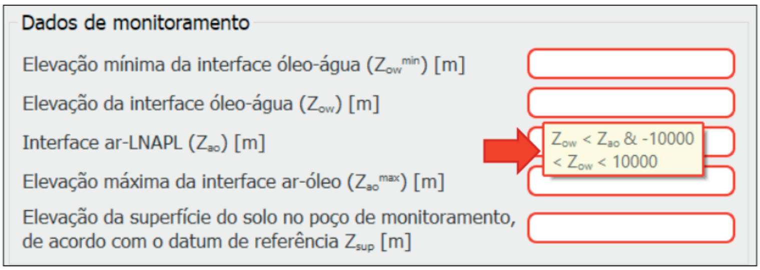


Figura 2.33. Exemplo de limite permitido

- **Caracterização do contaminante**

Para caracterizar o contaminante, o usuário deve selecionar o tipo de LNAPL responsável pela contaminação (Figura 2.34). As informações serão automaticamente preenchidas, de acordo com o que já foi cadastrado no banco de dados. Caso o usuário precise editar ou adicionar um novo produto, basta clicar no botão de engrenagem ao lado para ser redirecionado ao banco de dados.

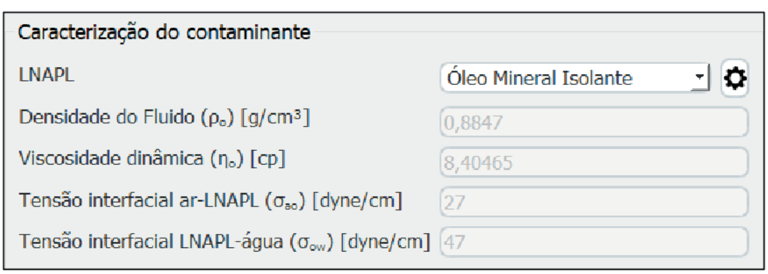


Figura 2.34. Caracterização do contaminante

- **Caracterização do meio poroso**

Para caracterizar o meio poroso, o usuário deve preencher as informações referentes ao tipo de solo. Dessa forma são apresentados os solos cadastrados no banco de dados, sendo possível efetuar um novo cadastro e/ou editar informações, ao clicar na engrenagem ao lado (Figura 2.35).

Ao escolher o tipo de solo, as informações cadastradas no banco de dados serão automaticamente preenchidas. A condutividade hidráulica deve ser preenchida com dados obtidos experimentalmente no local de estudo, observando os limites padrão estipulados no *software*. Ao optar pelo modelo de Jeong e Charbeneau (2014), será necessário o preenchimento do “f-factor” ou “Saturação Residual de Óleo”. Para mais informações sobre qual opção utilizar, consulte o Item 3.6

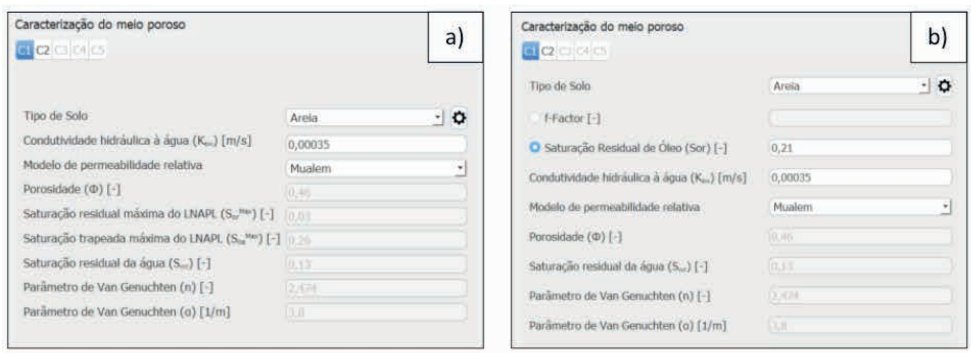


Figura 2.35. Dados do meio poroso requeridos. a) Modelo de Lenhard, Rayner e Davis (2017). b) modelo de Jeong e Charbeneau (2014)

No campo “Modelo de permeabilidade relativa” existem duas opções para o cálculo: Mualem (1976) e Burdine (1953). Para mais informações sobre qual modelo pode ser utilizado, consulte o Item 3.4. É possível adicionar até cinco camadas de solo para caracterizar o meio poroso. Cada uma delas requer a seleção do tipo de solo e o preenchimento dos parâmetros mencionados acima. Além disso, a cada camada adicionada é necessário inserir a elevação entre as interfaces das camadas, conforme Figura 2.36. Para mais informações sobre o preenchimento destas elevações, consulte o modelo conceitual no Item 3.5.

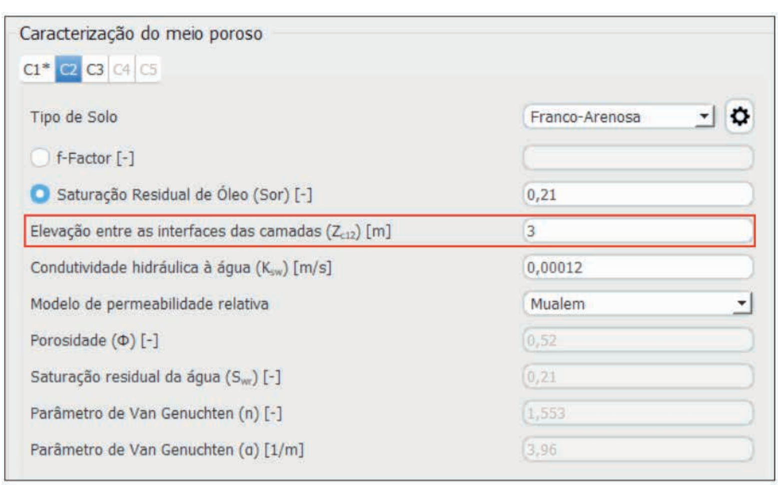


Figura 2.36. Segunda camada para caracterização do meio poroso

2.7.3 Rede de poços de monitoramento

Após importar o *template* no formato *.csv* com os dados de entrada preenchidos ou adicionar os poços de forma individual, haverá uma rede de poços cadastrados, como mostra a Figura 2.37.

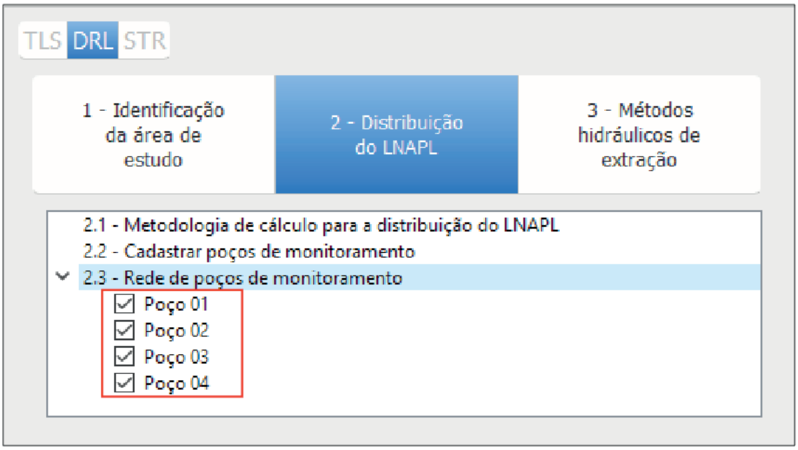


Figura 2.37. Rede de poços de monitoramento cadastrados

A rede de poços cadastrada pode ser exportada para uma planilha eletrônica em formato *.csv.* Para isso, basta selecionar a opção “Exportar dados da entrada para *csv*”, conforme Figura 2.38.

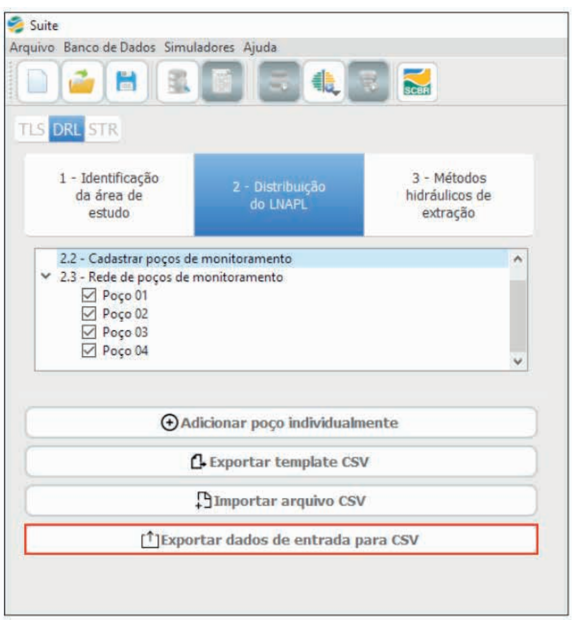


Figura 2.38. Exportar dados de entrada para *.csv*

2.7.4 Cálculo da distribuição do LNAPL

Para efetuar o cálculo da distribuição do LNAPL, o usuário pode clicar sobre o poço cadastrado com o botão direito do *mouse* e selecionar a opção desejada, como indicado na Figura 2.39. Outra maneira é clicar no ícone da barra de ferramentas, indicado na Figura 2.40. Em seguida, deve-se selecionar “Distribuição” e escolher a simulação para todos os poços ou apenas para os poços selecionados na “Rede de poços de Monitoramento”.

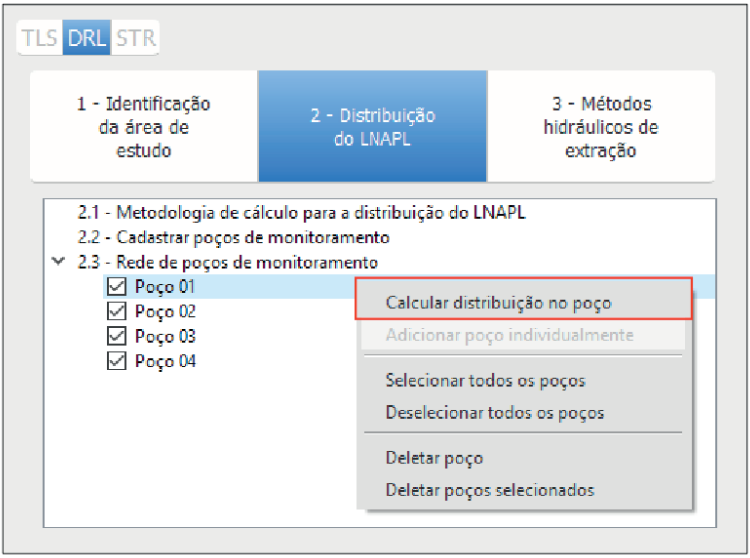


Figura 2.39. Cálculo da distribuição no poço de monitoramento

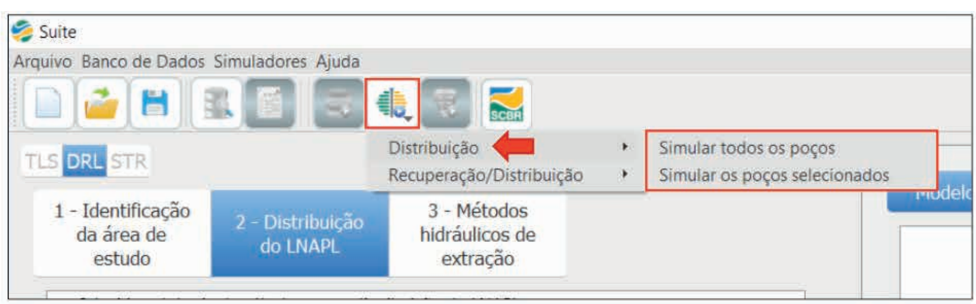


Figura 2.40. Cálculo da distribuição e simulação dos poços

2.7.5 Resultados da distribuição de LNAPL

Após calcular a distribuição de LNAPL, são apresentados os resultados de saturações, transmissividade e volumes na interface à direita, para cada poço de monitoramento cadastrado (Figura 2.41).

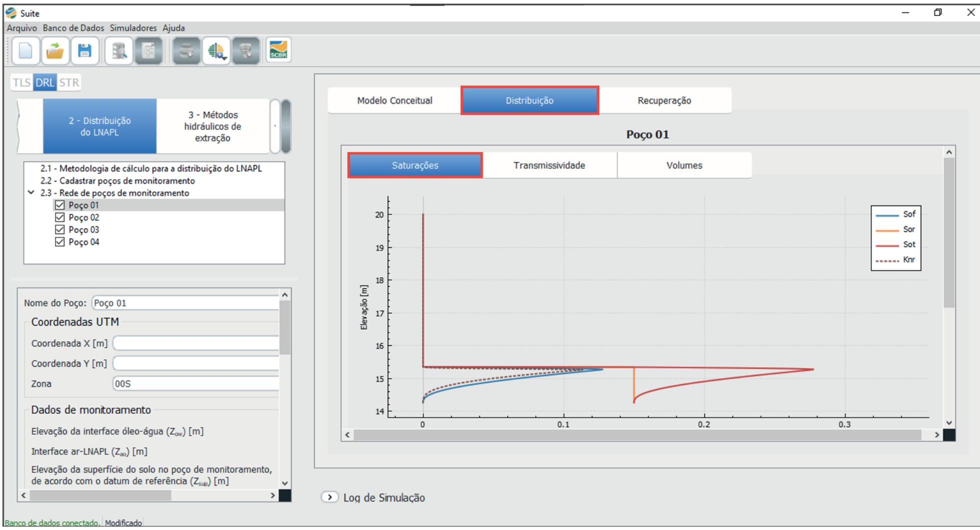


Figura 2.41. Resultados da Distribuição de LNAPL

O gráfico pode ser movimentado através do *scroll* do *mouse* para aproximar ou afastar seu tamanho e escala. Ao colocar o cursor do *mouse* sobre um ponto específico do gráfico, são apresentados os resultados pontuais na parte inferior do gráfico (Figura 2.42).

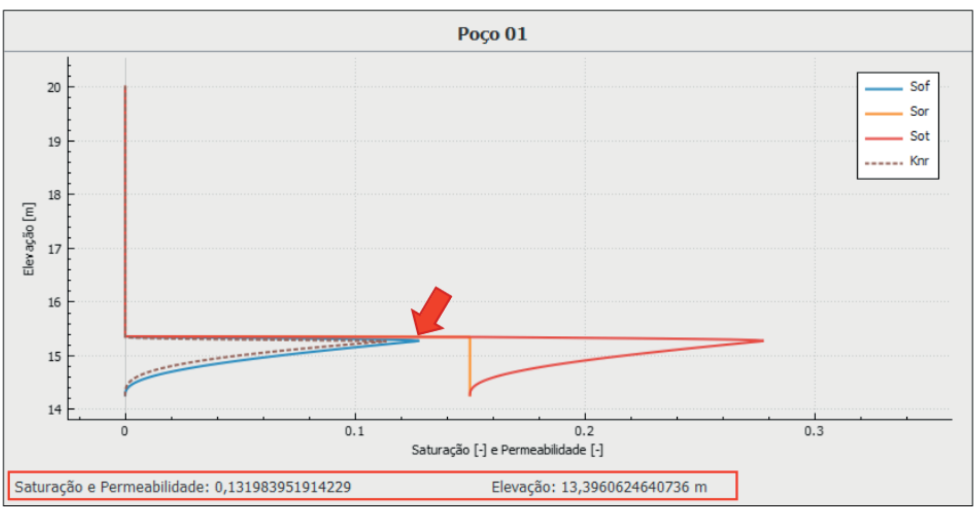


Figura 2.42. Resultados de saturação/permeabilidade e elevação

No campo "gráficos", é possível selecionar os parâmetros a serem visualizados, bastando ativá-los, como mostra a Figura 2.43. No item "Parâmetros do gráfico" são apresentadas as informações calculadas automaticamente pelo simulador com base nos dados inseridos. O usuário pode modificar caso desejar, entretanto, recomenda-se que seja utilizado o padrão. É possível alterar o número de pontos do gráfico para melhorar a precisão

do cálculo ou aumentar a velocidade de cálculo. Caso deseje-se que o cálculo seja feito de forma mais rápida, os pontos podem ser diminuídos, no entanto, isso irá afetar a precisão dos resultados. Os dados modificados podem ser salvos e exportados em formato *.csv* (Figura 2.43).

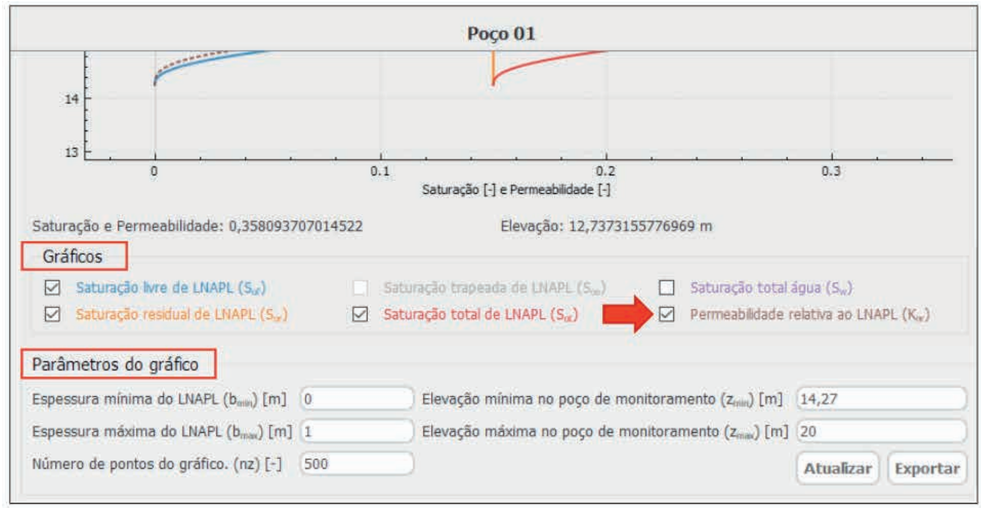


Figura 2.43. Parâmetros do gráfico

O usuário pode navegar nas abas "Saturações, Transmissividade e Volumes" para observar graficamente outros resultados da distribuição (Figura 2.44). Na aba "Transmissividade" são apresentados os resultados de transmissividade em função da variação da espessura de LNAPL, enquanto na aba "Volumes" tem-se os resultados de volume livre, residual, trapeado e total de LNAPL.

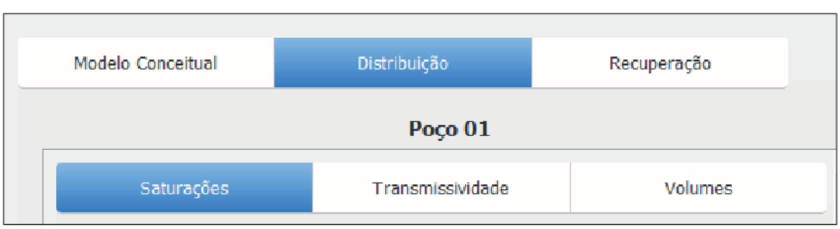


Figura 2.44. Aba de resultados da distribuição

2.7.6 Exportar resultados de distribuição

Para exportar os resultados da distribuição de LNAPL nos poços de monitoramento, o usuário deve clicar em "Exportar", na parte inferior dos resultados gráficos (Figura 2.45), ou no caminho a partir da barra de ferramentas: "Simuladores ⟶ DRL ⟶ Distribuição ⟶ Exportar resultado de todos os poços ou poços selecionados" (Figura 2.46). Nessa situação, irá aparecer uma janela para salvar os dados em arquivo *.csv* em seu computador.

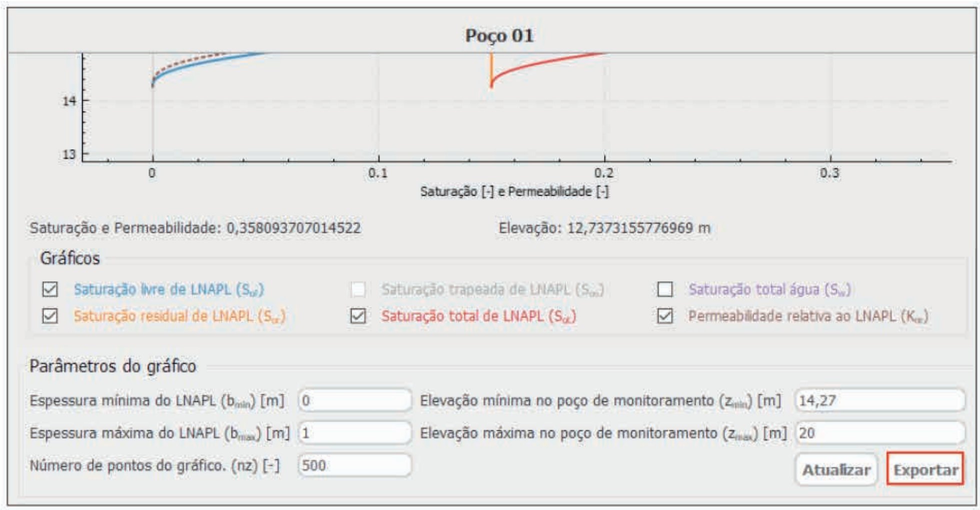


Figura 2.45. Exportar resultados distribuição

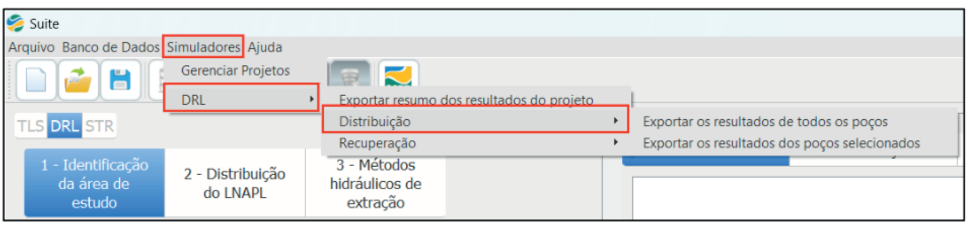


Figura 2.46. Exportar resultados distribuição pela barra de ferramentas

2.8 Recuperação de LNAPL

A partir do cálculo da distribuição de LNAPL é possível simular a extração nos poços de monitoramento com métodos hidráulicos de recuperação. Estão disponíveis no DRL quatro técnicas de extração*: Skimming, Water Enhanced, Vacuum Enhanced* e Trincheira.

- ***Skimming:*** É uma técnica de remediação que promove a extração da fase livre do LNAPL com pouca ou quase nenhuma recuperação de água subterrânea, utilizando apenas os gradientes naturais (U.S EPA, 1996; ITRC, 2018).

- ***Water Enhanced:*** A técnica de Extração Total dos Líquidos, também conhecida como *Pump&Treat,* consiste na extração tanto do LNAPL quanto da água subterrânea, que são removidos por meio do cone de rebaixamento, ocasionado pelo bombeamento da água subterrânea. O rebaixamento da água subterrânea amplia o gradiente hidráulico e impulsiona os fluidos para o poço de bombeamento, reduzindo a saturação de produto.

- ***Vacuum Enhanced:*** A técnica *Bioslurping*, conhecida também como *Vacuum Enhanced Skimming*, combina recuperação de fase livre de LNAPL com recuperação da fase vapor na zona não saturada e franja capilar, e acelera o

processo de biodegradação aeróbia do LNAPL por meio da injeção de oxigênio na zona não saturada (técnica conhecida como Bioventing). Esse evento reduz a concentração dos compostos biodegradáveis (ITRC, 2018; NFESC, 1998a; CANADA, 2019; FRTR, 2002c).

- **Trincheira:** O gradiente hidráulico natural de águas subterrâneas é transferido para a camada de LNAPL e o transporta para a trincheira, onde o LNAPL é removido por poços *skimmer* ou outra tecnologia.

Para o cálculo da recuperação devem ser indicados os métodos de extração para cada poço de monitoramento cadastrado. Caso o usuário queira simular a mesma técnica para todos os poços, basta selecionar a opção "Cadastrar poços de monitoramento ⟶ Escolher o método de extração ⟶ Aplicar método aos poços selecionados" (Figura 2.47). Também é possível selecionar uma técnica para cada poço, como mostra a Figura 2.48.

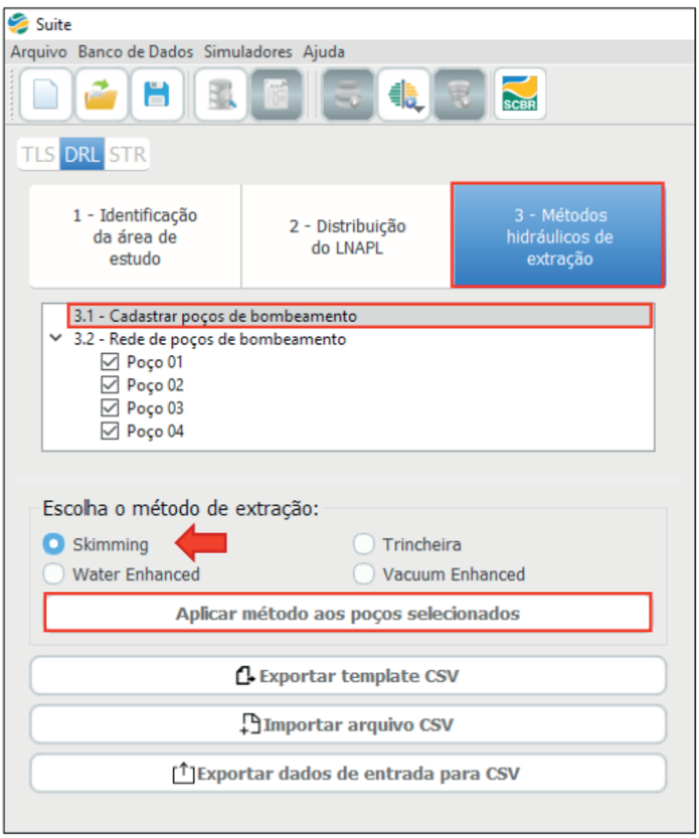


Figura 2.47. Seleção da técnica de extração de LNAPL para todos os poços

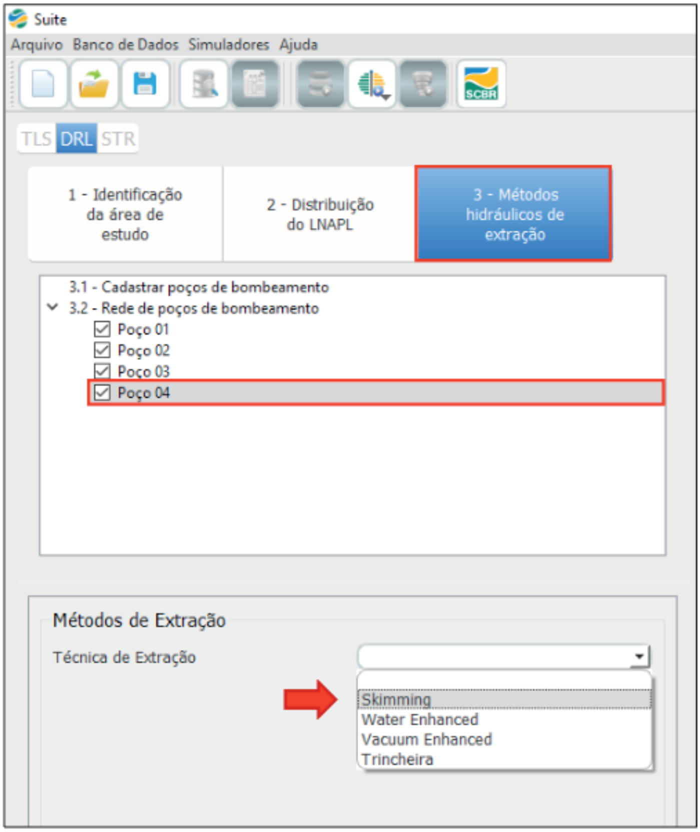


Figura 2.48. Seleção da técnica de extração de LNAPL para cada poço

Ao escolher a técnica de extração, deve-se inserir os dados de entrada pertinentes ao método selecionado. Para a técnica de *Skimming*, por exemplo, é necessário preencher informações sobre o tempo de recuperação, raio do poço e raio de captura (Figura 2.49). Para verificar os limites e valores aceitáveis em cada campo, basta deixar o *mouse* em cima do parâmetro de interesse para verificar sua descrição.

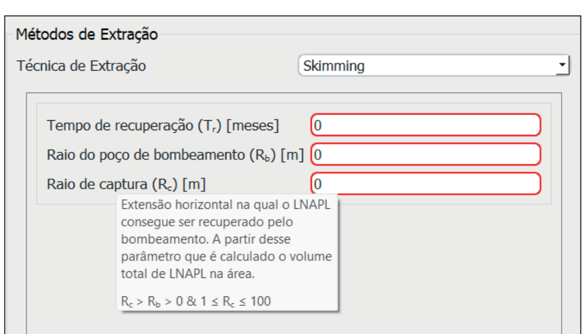


Figura 2.49. Seleção da técnica de extração de LNAPL e limites padrões

Também é possível inserir os dados de entrada das técnicas de extração por meio da importação de um arquivo no formato *.csv*. O *template* difere a depender da técnica de extração. Para exportar o *template,* basta selecionar a técnica desejada e clicar em “Exportar *template csv”*, conforme Figura 2.50.

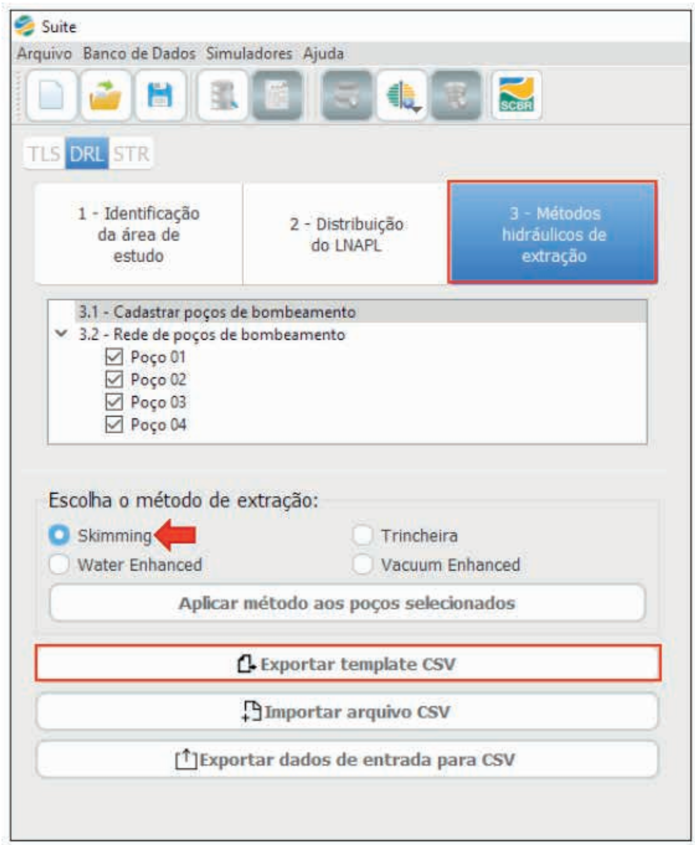


Figura 2.50. Exportar *template* no formato *.csv* para técnicas de extração

2.8.1 Cálculo da recuperação de LNAPL

O cálculo da recuperação só pode ser realizado após a etapa de distribuição. É possível realizar o cálculo de recuperação/distribuição clicando em cima do poço desejado com o botão direito do *mouse* (Figura 2.51). Ou então, pode-se clicar no ícone apresentado na Figura 2.52.

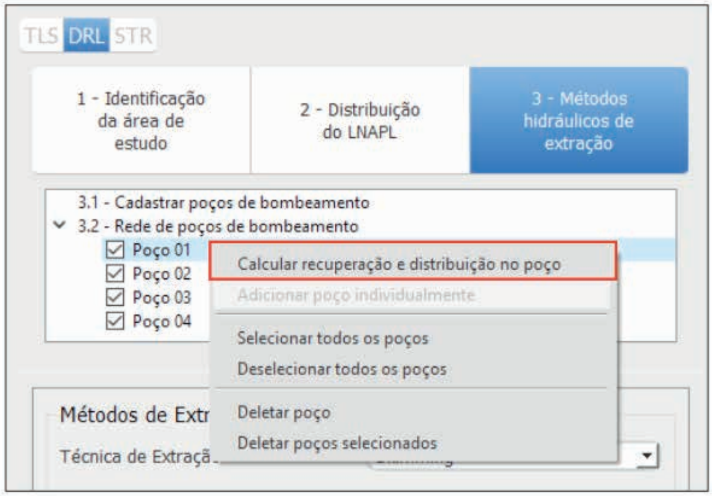


Figura 2.51. Atalho para calcular recuperação e distribuição

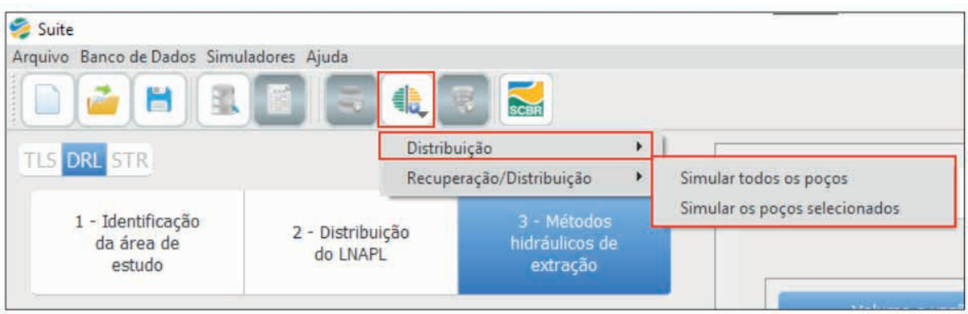


Figura 2.52. Cálculo da recuperação e distribuição

2.8.2 Resultados da recuperação de LNAPL

Após realizar a simulação, os resultados são apresentados na aba “Recuperação”, ao lado direito da interface (Figura 2.53). Entre os resultados, tem-se: Volume Recuperável, Volume Total de LNAPL, Volume Recuperado e Vazão de Recuperação, Espessura de LNAPL no poço, além do *Drawdown* para a técnica de *Water Enhanced* e o *Buildup* para o *Vacuum Enhanced*. Assim como nos resultados anteriores, é possível verificar dados pontuais do gráfico através do cursor, utilizar o *scroll* do *mouse* para aproximar os dados, selecionar os elementos que se deseja avaliar e atualizar ou exportar os dados calculados através do *software*.

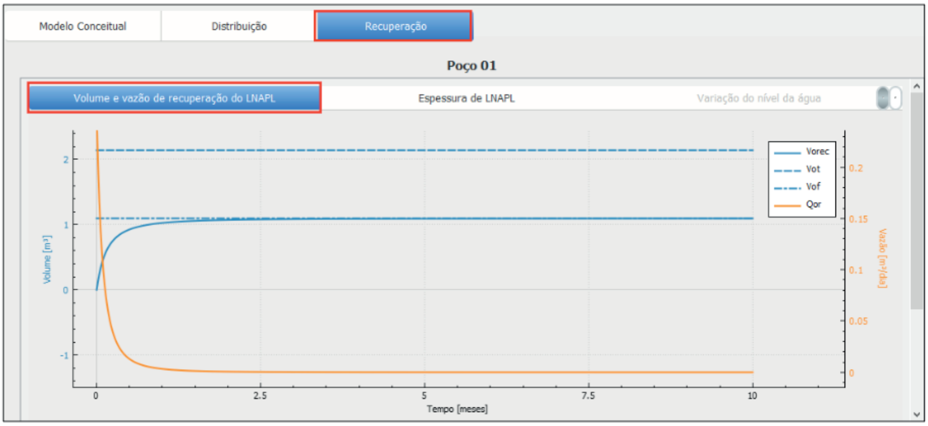


Figura 2.53 Gráfico volume e vazão de recuperação

2.8.3 Exportar resultados de recuperação

Para exportar os resultados da extração de LNAPL dos poços de monitoramento, o usuário deve clicar em “Exportar”, na parte inferior dos resultados gráficos (Figura 2.54), ou no caminho a partir da barra de ferramentas: “Simuladores ⟶ DRL ⟶ Recuperação ⟶ Exportar os resultados de todos os poços ou somente dos poços selecionados” (Figura 2.55). Nessa situação, irá aparecer uma janela para salvar os dados em seu computador.

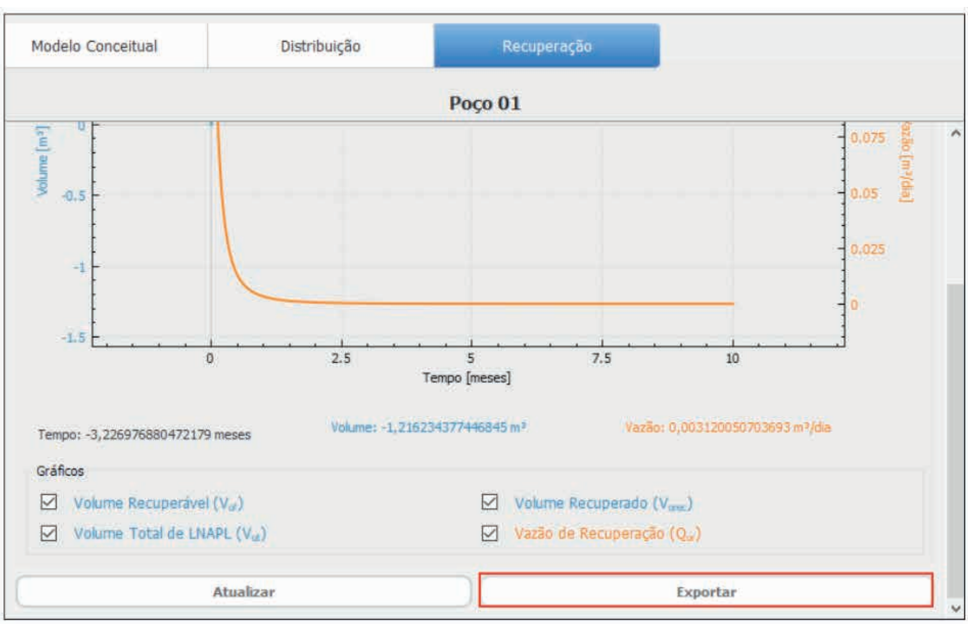


Figura 2.54. Exportar resultados da recuperação

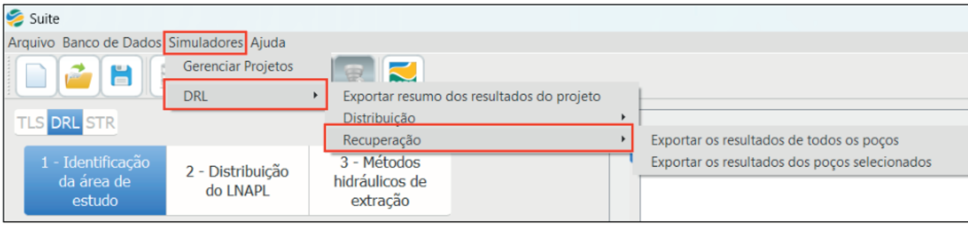


Figura 2.55. Exportar resultados da recuperação a partir da barra de ferramentas

3 PERGUNTAS FREQUENTES

3.1 Como salvar e compartilhar os projetos do SUITE?

Os projetos executados no SUITE ficam armazenados em arquivos com extensão *".db"*, criados sempre ao inicializar o *software*, conforme descrito no Item 2.1. Para compartilhar os dados de entrada utilizados na simulação, incluindo as áreas e subáreas cadastradas, solos e produtos inseridos no banco de dados, basta compartilhar o arquivo com extensão *.db* de interesse.

Sugere-se que, ao criar o banco de dados, o usuário nomeie o arquivo com informações que facilitem sua identificação. O prefixo "BD" pode ser inserido para remeter ao arquivo do banco de dados. Também podem ser inseridas informações sobre o responsável técnico e a data de criação do banco de dados, conforme o exemplo descrito na Figura 3.1.

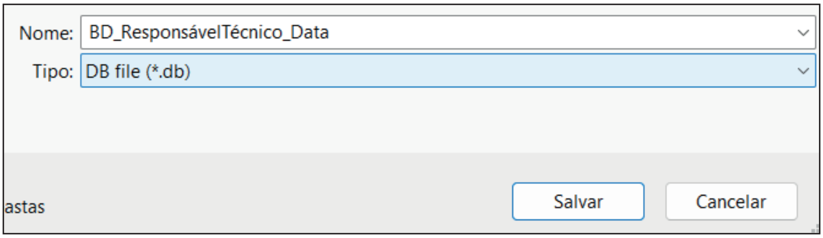


Figura 3.1. Sugestão de identificação do arquivo extensão *.db*

Ressalta-se que este arquivo possui atualização automática; ou seja, ao longo da simulação, as alterações feitas serão registradas. Caso o usuário deseje abrir uma simulação realizada anteriormente em um banco de dados existente, ao abrir o SUITE, deverá clicar em "Carregar banco de dados" e selecionar o arquivo *.db* no qual a simulação foi previamente criada (Figura 3.2).

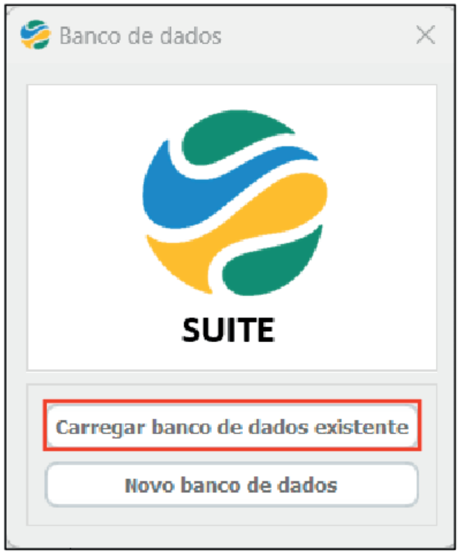


Figura 3.2. Seleção de banco de dados criado previamente

3.2 Separador decimal do sistema operacional e importação de arquivos *.csv*

A importação de arquivos no formato *.csv* se adapta de acordo com a escolha do separador decimal do sistema operacional do usuário. Portanto, se o sistema utiliza o ponto (.) como separador decimal, o simulador espera que o arquivo *.csv* apresente os dados de entrada com o ponto (.) como separador decimal também, fazendo com que a vírgula se torne um carácter de texto. No entanto, é importante se certificar que o separador de lista do sistema operacional seja o ponto e vírgula (;). Caso o seu computador utilize o padrão internacional, é necessário alterar o separador de vírgula (,) para ponto e vírgula (;).

Dessa forma, é importante ficar atento ao formato do arquivo *.csv*. Caso esteja diferente do separador decimal do sistema operacional do usuário, haverá um problema na importação e leitura dos arquivos. Se isso ocorrer, basta alterar o separador decimal do sistema operacional nas configurações do computador e em seguida fechar e abrir o SUITE novamente. Outra maneira de corrigir esse problema, é alterar o separador decimal no próprio arquivo *.csv*.

Vale ressaltar que se o *template* no formato *.csv* for exportado no DRL e logo em seguida preenchido com os dados de entrada, a importação desse arquivo para o SUITE não gerará problemas, visto que todos os arquivos foram criados e preenchidos com o mesmo separador decimal.

3.3 Metodologia de distribuição do LNAPL: Lenhard ou Charbeneau?

O modelo de **Jeong e Charbeneau (2014)** possibilita estimar as saturações total e residual de LNAPL a partir de poços de monitoramento, bem como os volumes representados por essas. Portanto, as equações governantes básicas desse modelo matemático consistem, basicamente, na distribuição da pressão em equilíbrio vertical e na relação trifásica (LNAPL-água-ar) de saturação-pressão (modelo de Van Genuchten).

O modelo de **Lenhard, Rayner e Davis (2017)** é um aprimoramento do modelo de Jeong e Charbeneau (2014) e permite considerar a variação no nível d'água em um poço de monitoramento, possibilitando o cálculo das saturações total, residual e trapeada de LNAPL, bem como os volumes representados por essas.

A saturação trapeada corresponde à fração de LNAPL que está retida na zona saturada devido à variação do nível da água, enquanto a fração de saturação residual corresponde à fração não móvel de LNAPL presente na zona não saturada. Ambas as formas de LNAPL são consideradas imóveis. Portanto, a distinção entre a saturação residual e a trapeada modifica o cálculo para a determinação da permeabilidade relativa, para a qual deve ser considerada apenas a fração móvel da saturação (LENHARD et al., 2004). Desse modo, o modelo de Lenhard pode ser selecionado quando existem informações sobre a variação do nível d'água e espessura de produto ao longo do tempo.

É importante destacar que, a depender da metodologia selecionada, os parâmetros necessários para realizar a simulação são alterados, portanto, o usuário deve verificar se possui os parâmetros essenciais em cada caso antes de realizar a simulação. Os dados de monitoramento requeridos para cada metodologia são apresentados na Tabela 3.1. Além disso, ao selecionar a metodologia de Jeong e Charbeneau (2014), será necessário optar entre o f-factor ou a saturação residual de óleo na etapa de caracterização do meio poroso. Para mais informações sobre qual parâmetro optar, consulte o Item 3.6.

Tabela 3.1. Parâmetros requeridos para a metodologia de Lenhard e Charbeneau

Dados de monitoramento	Metodologia	
	Lenhard, Rayner e Davis (2017)	**Jeong e Charbeneau (2014)**
Elevação mínima da interface óleo-água (Z_{ow}^{min}) [m]	Sim	Não
Elevação da interface óleo-água (Z_{ow}) [m]	Sim	Sim
Interface ar-LNAPL (Z_{ao}) [m]	Sim	Sim
Elevação máxima da interface ar-óleo ($Z_{ao}^{máx}$) [m]	Sim	Não
Elevação da superfície do solo no poço de monitoramento, de acordo com o datum de referência (Z_{sup})[m]	Sim	Sim

3.4 Qual modelo de permeabilidade relativa selecionar: Mualem ou Burdine?

A permeabilidade relativa é a razão entre a permeabilidade efetiva do meio para um fluido em uma saturação específica e a permeabilidade do meio ao fluido a 100% de saturação. Os valores para permeabilidade relativa variam entre 0 e 1.

O DRL apresenta duas opções de modelos para o cálculo da permeabilidade relativa: Mualem (1976) e Burdine (1953). Jeong e Charbeneau (2014) recomenda que o modelo de Burdine seja utilizado em solos mais grossos, como areia. Já o modelo de Mualem é recomendado para partículas de solos mais finos. Além disso, o modelo de Mualem é utilizado para valores de “n” (parâmetro de Van Genuchten) > 1, enquanto o de Burdine para “n” > 2.

3.5 Como identificar as informações sobre elevações?

Na etapa “dados de monitoramento”, é necessário inserir as informações sobre as elevações de LNAPL, água e ar medidas nos poços de monitoramento. As informações requeridas nesta etapa variam de acordo com a metodologia escolhida (Lenhard ou Charbeneau).

O primeiro passo para determinar as elevações é definir o datum. Ele representa a superfície de referência para o levantamento de dados relativos à altitude (datum altimétrico). Podem ser utilizados o datum vertical oficial do Brasil (Imbituba, Santa Catarina) ou outra superfície que facilite a identificação das elevações, como, por exemplo, o datum pode ser posicionado na superfície do terreno, ou seja, $Z_{sup} = 0$. Dessa maneira, as elevações seriam representadas pela profundidade em relação ao solo (valores negativos). A partir do datum definido, devem ser identificadas as elevações em relação ao datum. O DRL traz em sua interface uma imagem do modelo conceitual que exemplifica como é feita a definição das elevações, em função da localização do datum (Figura 3.3 e Figura 3.4).

Ao adicionar novas camadas de solo na etapa de caracterização do meio poroso, é necessário identificar a elevação entre as interfaces das camadas. Esta medida corresponde a distância entre a interface de dois solos diferentes até o datum. A cada camada adicionada, deve ser preenchida uma nova elevação, representada por Z_{C12}, Z_{c23}, Z_{c34} e Z_{45}, onde o subíndice indica a interface que está sendo analisada. Ou seja, ao adicionar uma segunda camada de solo, será necessária a informação da elevação entre a interface das camadas de solo 01 e 02, que é representada por Z_{c12}. Abaixo são apresentados os modelos conceituais conforme metodologia de cálculo selecionada.

Para o modelo de **Lenhard, Rayner e Davis (2017):**

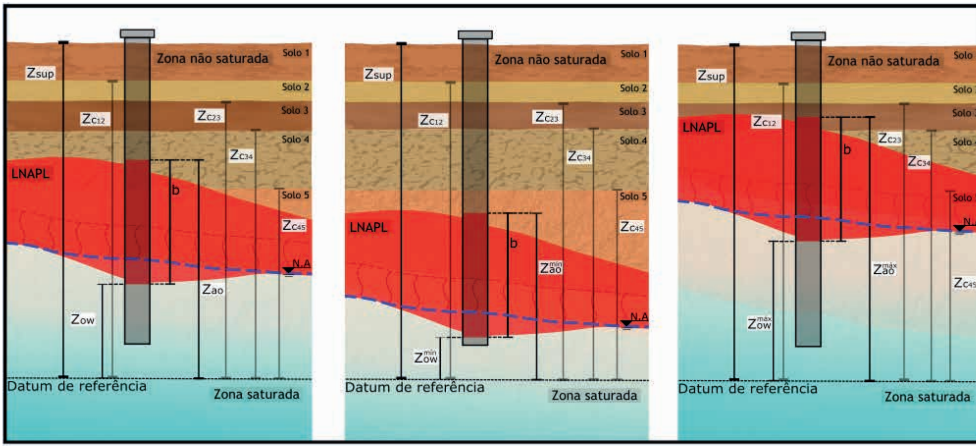


Figura 3.3. Modelo conceitual para Lenhard, Rayner e Davis (2017)

- **Elevação mínima da interface óleo-água (Z_{ow}^{min}) [m]:** Corresponde à medida do datum de referência até o menor valor da interface óleo-água medida ao longo do período de monitoramento.
- **Elevação da interface óleo-água (Z_{ow}) [m]:** Corresponde à medida "atual" do datum de referência até a interface óleo-água.
- **Interface ar-LNAPL (Z_{ao}) [m]:** Corresponde à medida do datum de referência até o nível "atual" da interface ar-LNAPL.
- **Elevação máxima da interface ar-óleo ($Z_{ao}^{máx}$) [m]:** Corresponde à medida do datum de referência até o maior valor da interface ar-óleo medida ao longo do período de monitoramento.
- **Elevação da superfície do solo no poço de monitoramento, de acordo com o datum de referência (Z_{sup}) [m]:** Corresponde à medida do datum de referência até a superfície do solo no poço de monitoramento.

Para o modelo de **Jeong e Charbeneau (2014):**

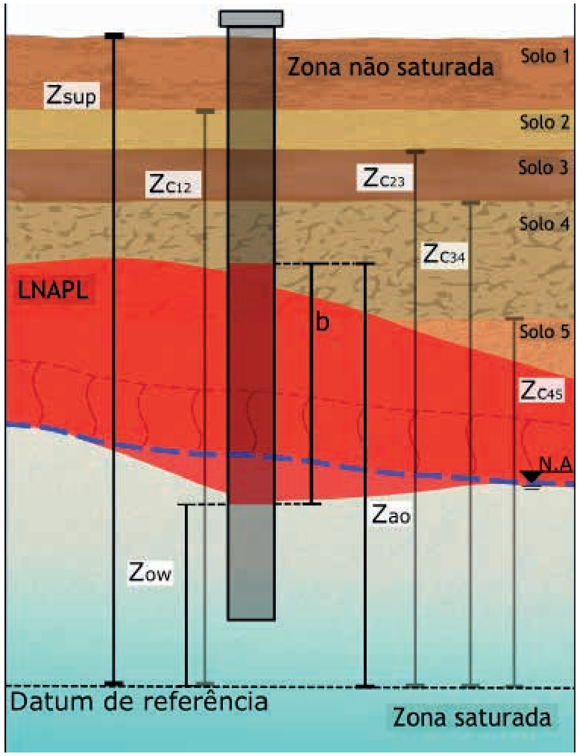


Figura 3.4. Modelo conceitual para Jeong e Charbeneau (2014)

- **Elevação da interface óleo-água (Z_{ow}) [m]:** Corresponde à medida "atual" do datum de referência até a interface óleo-água.
- **Interface ar-LNAPL (Z_{ao}) [m]:** Corresponde à medida do datum de referência até o nível "atual" da interface ar-LNAPL.
- **Elevação da superfície do solo no poço de monitoramento, de acordo com o datum de referência (Z_{sup}) [m]:** Corresponde à medida do datum de referência até a superfície do solo no poço de monitoramento.

3.6 Qual saturação escolher: f-factor ou Saturação Residual de Óleo?

A saturação residual de LNAPL representa a fração de LNAPL que permanece imóvel e irrecuperável hidraulicamente no meio poroso, ou seja, com transmissividade insignificante. Na modelagem matemática realizada com o DRL, é possível informar, como dado de entrada, uma saturação residual constante por camada de solo, ou uma saturação variável, dada a saturação inicial. Esses parâmetros são solicitados na metodologia de distribuição de Jeong e Charbeneau (2014). Não é necessário o preenchimento das duas variáveis.

Ao optar por inserir um valor para a "Saturação Residual de Óleo", o usuário estará considerando um valor constante de saturação residual, igual ao valor inserido. Caso o

usuário opte por adicionar um valor para o f-factor, a saturação residual será variável de acordo com a espessura inicial de LNAPL.

Ambos dados de entrada são de difícil determinação. Normalmente, uma análise laboratorial pode ser realizada para estimar a saturação residual. Entretanto, essa é uma estimativa da saturação residual para determinado local e profundidade, visto que a saturação residual varia localmente e, normalmente, não pode ser definida como um único número. Para contemplar essa faixa de variabilidade, podem ser coletadas amostras de solo em uma determinada sondagem e comparadas com o intervalo onde existe LNAPL móvel. As amostras fora do intervalo de LNAPL móvel representam valores de LNAPL residual (ITRC, 2018).

Os experimentos sugerem que os valores de saturação residual LNAPL aumentam linearmente com o aumento da saturação de LNAPL inicial. Isso significa que as regiões que acumulam maiores saturações LNAPL durante um vazamento reterão maiores saturações residuais de LNAPL durante a migração e recuperação subsequentes. Essa característica pode ser considerada através do f-factor.

A escolha entre o uso do f-factor ou a saturação residual de óleo deve ser feita com base na calibração do modelo em relação aos dados obtidos em campo. Deve-se ajustar o modelo por meio dos parâmetros já conhecidos, até que se atinja um valor satisfatório. Aquele que melhor representar os dados observados em campo deverá ser escolhido

3.7 Como cadastrar poços de monitoramento via *template* em formato *.csv*?

A importação de poços de monitoramento via *template* no formato *.csv* tem como principal finalidade realizar o cadastro de múltiplos poços de monitoramento de forma rápida e eficaz. Inicialmente, *é necessár*io selecionar a metodologia de cálculo desejada, pois os parâmetros contidos no *template* variam conforme esta seleção. Para mais informações sobre os parâmetros requeridos em cada uma das metodologias, consulte o Item 3.3. No exemplo em questão, foi selecionada a metodologia de Jeong e Charbeneau (2014) na etapa “Metodologia de cálculo para a distribuição do LNAPL”, e, em seguida, selecionada *a opção* “Exportar *template* .csv”, conforme Figura 3.5.

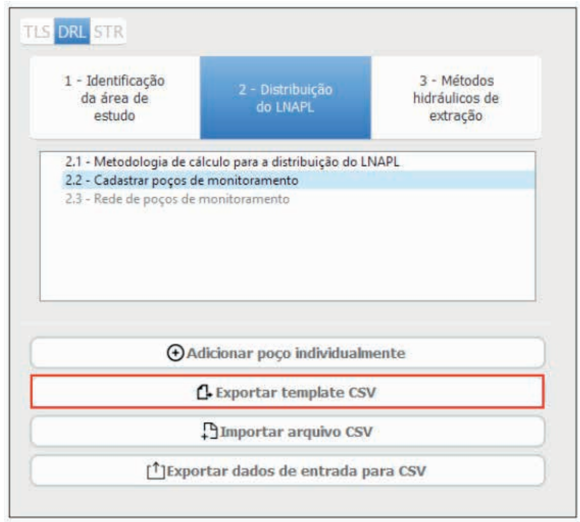


Figura 3.5. Exportar *template* formato *.csv*

Para preencher o *template* são necessárias informações sobre a identificação dos poços, dados de monitoramento, caracterização do meio poroso e o nome do contaminante presente no local. Caso as informações referentes ao tipo de solo e contaminante não estejam inseridas no banco de dados, devem ser previamente cadastradas, conforme demonstrado no Item 2.3.1. O parâmetro f-factor não é aplicável a este exemplo, portanto, não deve ser preenchido.

É necessário atentar-se para o correto preenchimento das informações, como os limites e a nomenclatura dos parâmetros exigidos. Os valores fora dos limites aceitáveis ou escritos de maneira incorreta resultarão em erro na importação. Um exemplo de como preencher um *template* de importação pode ser verificado na Figura 3.6 e Figura 3.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Nome	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]	Zona	Elevacao da interface oleo-agua (Zow) [m]	Interface ar-LNAPL (Zao) [m]	Elevacao da superficie do poco de monitoramento (Zsup) [m]	1ª Camada do solo	C1 Modelo de Permeabilidade Relativa	f-factor da 1ª camada (C1_f-factor)[-]	Saturacao residual de oleo da 1ª camada (C1_Sor) [-]	Condutividade hidraulica da 1ª camada (Ksw_C1) [m/s]	2ª Camada do solo	C2 Modelo de Permeabilidade Relativa	Elevacao entre as interfaces das camadas (Zc12) [m]	f-factor da 2ª camada (C2_f-factor)[-]	Saturacao residual de oleo da 2ª camada (C2_Sor) [-]	Condutividade hidraulica da 2ª camada (Ksw_C2) [m/s]	3ª Camada do solo
2	Poço 01	416329,5	7432552,2	23S	-23,76	-23,72	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	1,22E-08	Argilo-siltosa	Mualem	-8		0,15	1,22E-08	Argilo-Arenosa
3	Poço 02	4146516,4	743454,3	23S	-23,87	-23,63	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	1,22E-08	Argilo-siltosa	Mualem	-8		0,15	1,22E-08	Argilo-Arenosa
4	Poço 03	416248,4	7438563,3	23S	-23,97	-23,96	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	2,75E-07	Argilo-siltosa	Mualem	-8		0,15	2,75E-07	Areia
5	Poço 04	415186,9	7431992,7	23S	-26,5	-23,04	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	1,22E-08	Argilo-siltosa	Mualem	-7		0,15	1,22E-08	
6	Poço 05	416031,2	7434533,1	23S	-23,84	-23,73	0	Argilo-siltosa	Mualem		0,15	1,22E-08							
7	Poço 06	416231,7	7432533,2	23S	-24,01	-23,93	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	2,75E-07	Franco-siltosa	Mualem	-2		0,15	2,75E-07	Argilo-Arenosa
8	Poço 07	416081,2	7434432,3	23S	-24,16	-23,92	0	Franco-siltosa	Mualem		0,15	2,75E-07	Argilo-siltosa	Mualem	-6		0,15	2,75E-07	Argilo-Arenosa
9	Poço 08	416008,6	7434453,8	23S	-23,65	-23,62	0	Argilo-siltosa	Mualem		0,15	1,22E-08							
10	Poço 09	416051,4	7434494	23S	-24,57	-22,82	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	1,22E-08	Argilo-siltosa	Mualem	-3		0,15	1,22E-08	Franco-arenosa
11	Poço 10	416043,5	7433793,7	23S	-24,74	-23,32	0	Argilo-Arenosa	Mualem		0,15	1,22E-08	Argilo-siltosa	Mualem	-3		0,15	1,22E-08	Franco-arenosa

Figura 3.6. Exemplo de preenchimento do *template* de dados de entrada Jeong e Charbeneau (2014)

	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1	C3 Modelo de Permeabilidade Relativa	Elevacao entre as interfaces das camadas (Zc23) [m]	f-factor da 3ª camada (C3_f-factor)[-]	Saturacao residual de oleo da 3ª camada (C3_Sor) [-]	Condutividade hidraulica da 3ª camada (Ksw_C3) [m/s]	4ª Camada do solo	C4 Modelo de Permeabilidade Relativa	Elevacao entre as interfaces das camadas (Zc34) [m]	f-factor da 4ª camada (C4_f-factor)[-]	Saturacao residual de oleo da 4ª camada (C4_Sor) [-]	Condutividade hidraulica da 4ª camada (Ksw_C4) [m/s]	5ª Camada do solo	C5 Modelo de Permeabilidade Relativa	Elevacao entre as interfaces das camadas (Zc45) [m]	f-factor da 5ª camada (C5_f-factor)[-]	Saturacao residual de oleo da 5ª camada (C5_Sor) [-]	Condutividade hidraulica da 5ª camada (Ksw_C5) [m/s]	Produto
2	Mualem	-22,5		0,15	1,22E-08													Gasolina A
3	Mualem	-19		0,15	1,22E-08													Gasolina A
4	Mualem	-23,5		0,15	2,75E-07													Gasolina A
5	Mualem																	Gasolina A
6																		Gasolina A
7	Mualem	-23		0,15	2,75E-07	Franco-siltosa	Mualem	-24		0,15	2,75E-07							Gasolina A
8	Mualem	-15		0,15	2,75E-07													Gasolina A
9																		Gasolina A
10	Mualem	-21		0,15	1,22E-08													Gasolina A
11	Mualem	-21		0,15	1,22E-08													Gasolina A

Figura 3.7. Exemplo de preenchimento do *template* de dados entrada Jeong e Charbeneau (2014) - *continuação*

Caso haja dúvidas sobre o correto preenchimento do *template*, sugere-se cadastrar um dos poços e suas informações, de forma individual, e, posteriormente, realizar a exportação dos dados para uma planilha em formato *.csv*, conforme Figura 3.8. Isto facilitará a visualização dos locais corretos para o preenchimento das informações e minimizará erros na importação do *template*.

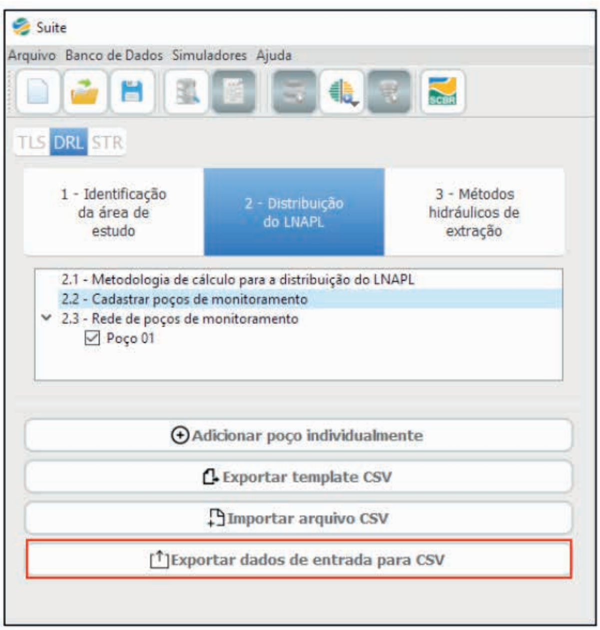


Figura 3.8. Exportar dados de entrada para formato *.csv*

Após realizar o preenchimento do *template*¸ o mesmo deve ser salvo e importado, através da opção “Importar arquivo *.csv*” (Figura 3.9).

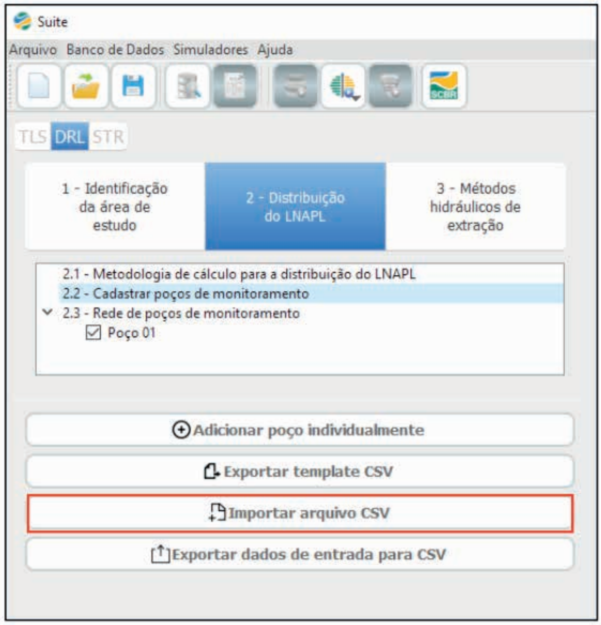
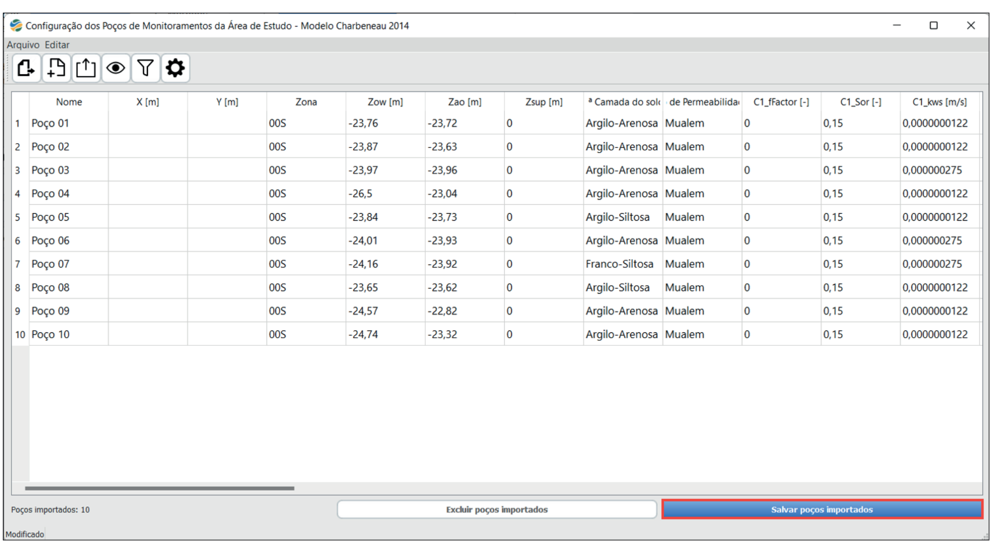


Figura 3.9. Importar *template* em formato *.csv*

Após importar, uma janela surgirá na interface do simulador para que sejam conferidas as informações importadas. Nessa etapa, o usuário pode realizar a alteração de informações, caso necessário (Figura 3.10). As informações preenchidas de forma incorreta não serão importadas, ficando destacadas em vermelho. O Item 3.8 traz informações sobre os erros mais comuns na importação do *template*.



	Nome	X [m]	Y [m]	Zona	Zow [m]	Zao [m]	Zsup [m]	ª Camada do solo	de Permeabilida	C1_fFactor [-]	C1_Sor [-]	C1_kws [m/s]
1	Poço 01			00S	-23,76	-23,72	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122
2	Poço 02			00S	-23,87	-23,63	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122
3	Poço 03			00S	-23,97	-23,96	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,000000275
4	Poço 04			00S	-26,5	-23,04	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122
5	Poço 05			00S	-23,84	-23,73	0	Argilo-Siltosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122
6	Poço 06			00S	-24,01	-23,93	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,000000275
7	Poço 07			00S	-24,16	-23,92	0	Franco-Siltosa	Mualem	0	0,15	0,000000275
8	Poço 08			00S	-23,65	-23,62	0	Argilo-Siltosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122
9	Poço 09			00S	-24,57	-22,82	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122
10	Poço 10			00S	-24,74	-23,32	0	Argilo-Arenosa	Mualem	0	0,15	0,0000000122

Figura 3.10. Janela para a conferência de informações dos poços importados – Distribuição de LNAPL

Para finalizar a importação, basta selecionar a opção "Salvar poços importados". Todas as informações inseridas corretamente serão automaticamente preenchidas no DRL, formando uma rede de poços de monitoramento, conforme Figura 3.11.

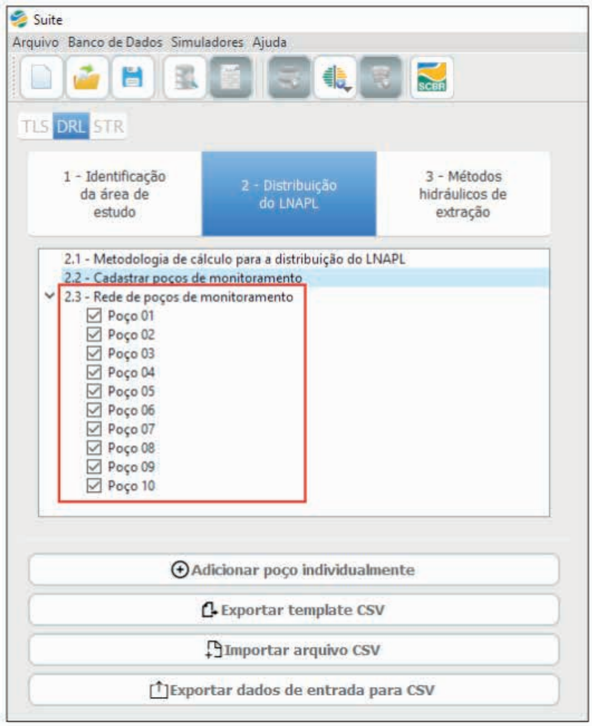


Figura 3.11. Rede de poços importados

Na etapa de recuperação, em "3 – Métodos hidráulicos de extração" aparecerão todos os poços já importados na etapa de distribuição. Para aplicar um método de extração a todos os poços, selecione o método desejado e, posteriormente, clique em "Aplicar método aos poços selecionados", conforme Figura 3.12. No exemplo em questão, foi optado pelo método *Water Enhanced*.

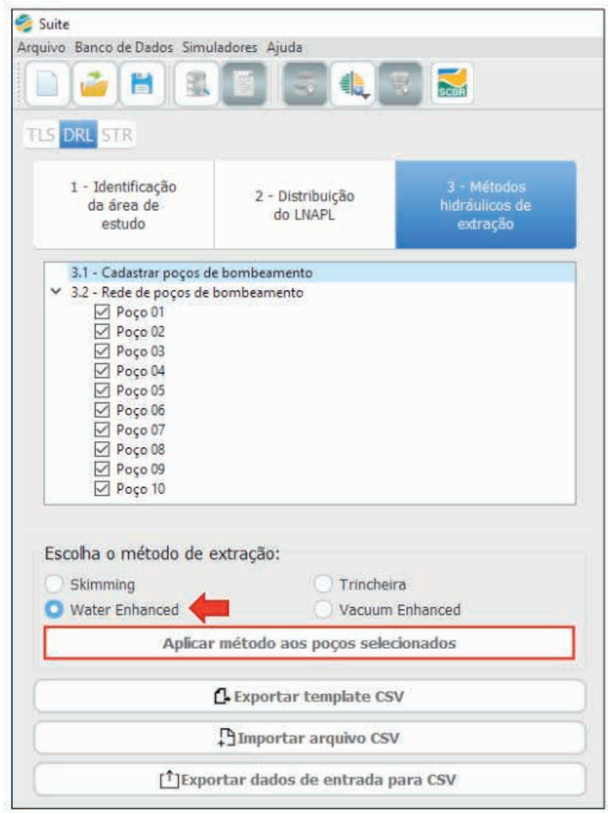


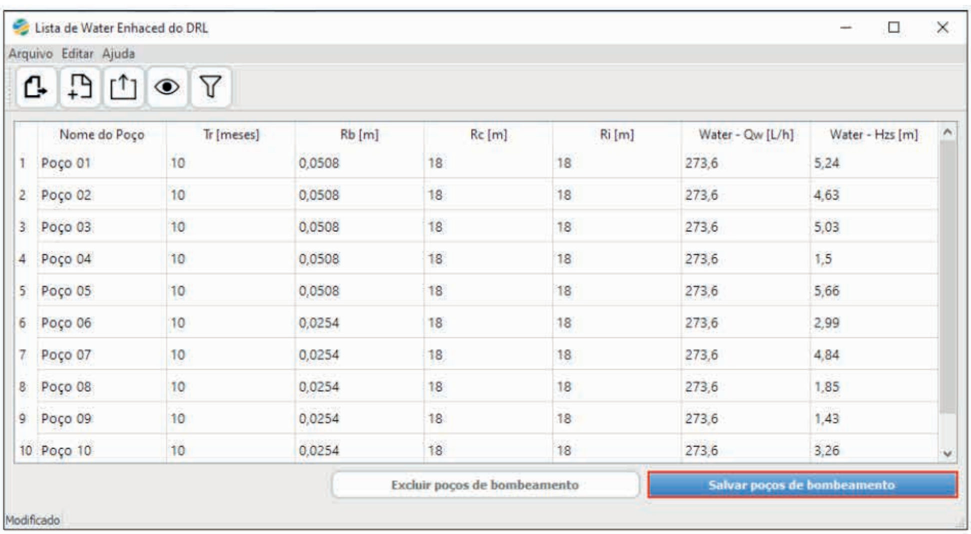
Figura 3.12. Aplicar método de extração a todos os poços

Após aplicar o método a todos poços, realize a exportação do *template* de forma análoga a etapa de distribuição. O *template* gerado terá o nome dos poços já preenchidos, conforme a rede de poços de bombeamento já cadastrada. As informações requeridas devem ser preenchidas conforme demonstrado na Figura 3.13, sendo todos os dados de caráter obrigatório para a realização da simulação. É importante ressaltar que cada técnica de extração possui um *template* único.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Nome do Poço de Bombeamento	Tempo de recuperação (Tr) [meses]	Raio do poço de bombeamento (Rb) [m]	Raio de captura (Rc) [m]	Raio de influência (Ri) [m]	Vazão de água (Qw) [L/h]	Espessura da zona saturada (Hzs) [m]
2	Poço 01	10	0,0508	18	18	273,6	5,24
3	Poço 02	10	0,0508	18	18	273,6	4,63
4	Poço 03	10	0,0508	18	18	273,6	5,03
5	Poço 04	10	0,0508	18	18	273,6	1,5
6	Poço 05	10	0,0508	18	18	273,6	5,66
7	Poço 06	10	0,0254	18	18	273,6	2,99
8	Poço 07	10	0,0254	18	18	273,6	4,84
9	Poço 08	10	0,0254	18	18	273,6	1,85
10	Poço 09	10	0,0254	18	18	273,6	1,43
11	Poço 10	10	0,0254	18	18	273,6	3,26

Figura 3.13. *Template* dos dados de entrada da técnica *Water Enhanced*

Para importar os dados, basta selecionar a opção "*Importar arquivo csv*". Para finalizar a importação, selecione a opção "Salvar poços de bombeamento" (Figura 3.14). Após esta etapa, todos os dados já foram cadastrados e poderão ser simulados para obter os resultados de distribuição e recuperação de LNAPL.



	Nome do Poço	Tr [meses]	Rb [m]	Rc [m]	Ri [m]	Water - Qw [L/h]	Water - Hzs [m]
1	Poço 01	10	0,0508	18	18	273,6	5,24
2	Poço 02	10	0,0508	18	18	273,6	4,63
3	Poço 03	10	0,0508	18	18	273,6	5,03
4	Poço 04	10	0,0508	18	18	273,6	1,5
5	Poço 05	10	0,0508	18	18	273,6	5,66
6	Poço 06	10	0,0254	18	18	273,6	2,99
7	Poço 07	10	0,0254	18	18	273,6	4,84
8	Poço 08	10	0,0254	18	18	273,6	1,85
9	Poço 09	10	0,0254	18	18	273,6	1,43
10	Poço 10	10	0,0254	18	18	273,6	3,26

Figura 3.14. Janela para a conferência de informações dos poços importados – Recuperação de LNAPL

3.8 Principais erros associados à importação de *templates* em formato *.csv*

Os erros associados à importação do *template* podem ocorrer devido a diversos fatores, impedindo a importação dos dados preenchidos. As informações incorretas serão destacadas em vermelho na janela de conferência, ou, então, por meio de uma mensagem de erro. Abaixo estão listados os principais erros associados à importação de *templates* no formato *.csv*:

- **Preenchimento incorreto da nomenclatura do tipo de solo ou produto:** Caso a nomenclatura do solo/produto do arquivo *.csv* não esteja de acordo com a cadastrada no banco de dados, resultará em uma mensagem de erro conforme a Figura 3.15. A nomenclatura preenchida no *template* precisa estar exatamente igual a cadastrada no banco de dados. Serão considerados inválidos os parâmetros escritos incorretamente, com espaços extras entre e no final das palavras, entre outros.

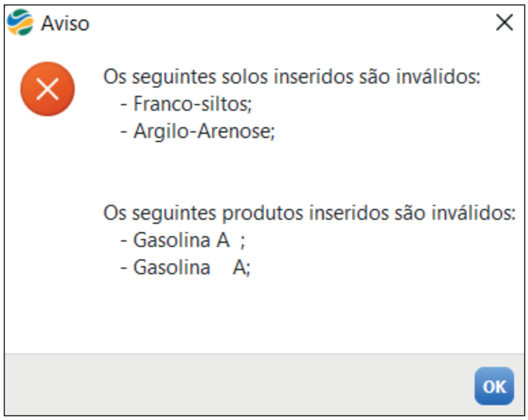


Figura 3.15. Mensagem de erro na importação

- **Valores fora dos limites ou que descumprem restrições:** Ao inserir os valores dos parâmetros requeridos no *template,* atente-se aos limites permitidos e suas restrições, caso contrário, o valor do parâmetro não será importado e ficará indicado em vermelho, conforme Figura 3.16.

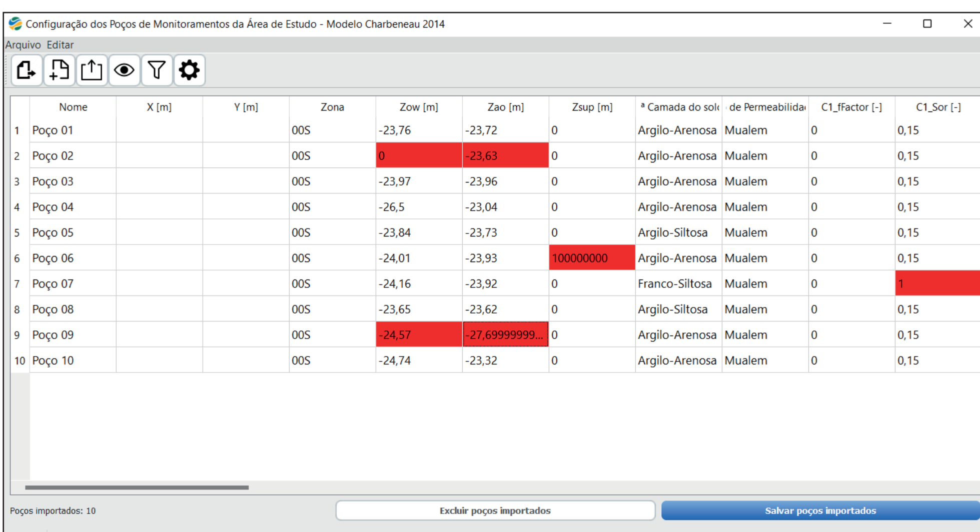


Figura 3.16. Valores fora dos limites e restrições

As informações referentes aos limites e restrições de cada parâmetro estão disponíveis na descrição dos parâmetros na interface do *software*. Para consultar, basta posicionar o cursor do *mouse* sobre o nome do parâmetro ou sobre o local de preenchimento, conforme demonstrado na Figura 2.33.

- **Nome diferente nos poços de monitoramento e bombeamento:** Como demonstrado no Item 3.7, após importar os poços de monitoramento e prosseguir para a etapa de recuperação de LNAPL, é formada uma rede de poços de bombeamento. Ao importar o *template* do método de extração desejado, caso algum dos poços apresente nome diferente do cadastrado na rede de poços de bombeamento, ocorrerá um erro e uma mensagem será apresentada (Figura 3.17).

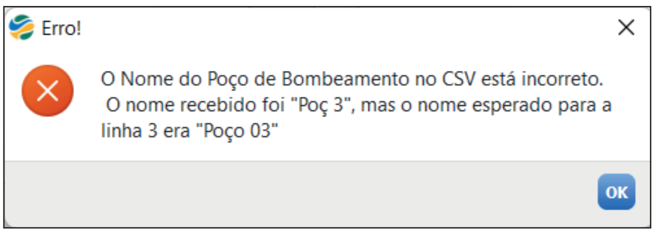


Figura 3.17. Mensagem de erro ao importar *template* com nome diferente de poços de monitoramento e bombeamento

- **Solo ou produto não cadastrado no banco de dados:** Tipos de solo ou produto que não constam no banco de dados devem ser previamente cadastrados, conforme demonstrado no Item 2.3.1. Caso contrário, ao tentar importá-los em um *template* serão considerados inválidos (Figura 3.18).

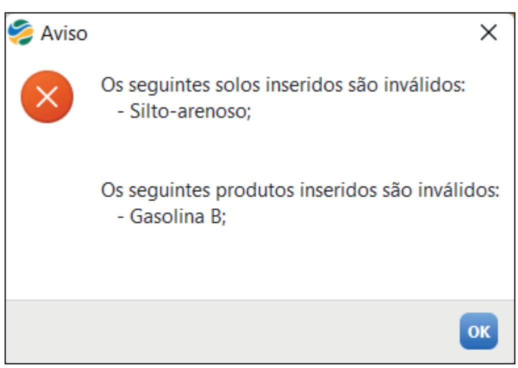


Figura 3.18. Aviso para produtos e tipos de solos inválidos

- **O *Template .csv* importado é diferente da metodologia de cálculo ou método de extração selecionados previamente:** ao importar um *template* na etapa de distribuição certifique-se de que o mesmo corresponde à metodologia de cálculo desejada, caso contrário, a importação não será bem-sucedida e uma mensagem de erro será apresentada (Figura 3.19). O mesmo se aplica ao

importar *templates* referentes à recuperação de LNAPL, deve-se atentar para que a escolha do *template* corresponda ao método de extração desejado.

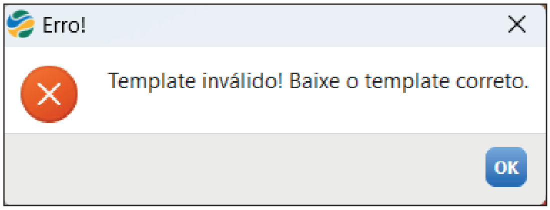


Figura 3.19. Aviso de erro ao importar *template* incorreto

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Este exemplo tomou como base o "Exemplo #3" apresentado no segundo volume do manual do usuário do Modelo de Distribuição e Recuperação de LNAPL – LDRM (API, 2007). Com este exemplo, é possível traçar comparativos entre os resultados obtidos pelo DRL e LDRM, além de validar o módulo de Jeong e Charbeneau (2014) do DRL com um cenário elaborado a partir de dados reais. As informações sobre a caracterização do modelo conceitual e os dados de entrada do problema foram extraídos diretamente do manual do LDRM (API, 2007).

4.1 Área de estudo e resumo do cenário de contaminação

A área de estudo corresponde a um posto de abastecimento de combustíveis e parada para caminhões. No decorrer de uma reforma no local, foi possível verificar que ocorreu um vazamento de gasolina fresca para o subsolo. O corpo de LNAPL presente no local ocupa, aproximadamente, 1.250 m² e localiza-se próximo aos antigos tanques de armazenamento, com o núcleo do corpo do LNAPL ocupando cerca de 900 m². O órgão regulador local solicitou a remoção de 90% do LNAPL livre presente no local. Para isso, o estudo visa aplicar diferentes técnicas de recuperação de óleo, avaliando qual a mais viável economicamente.

Para analisar o sistema de recuperação, devem ser verificadas e inseridas as propriedades do solo e dos fluidos, juntamente com os dados do sistema de recuperação, tanto para as águas subterrâneas como para o LNAPL. Parte destes dados são obtidos com investigações e coletas no local ou estimados através de bancos de dados, como, por exemplo, o do Instituto de Petróleo Americano (em inglês, *American Petroleum Institute* - API).

Para avaliar este exemplo, foi considerado que a extração do LNAPL será realizada com duas tecnologias: o método *Skimming* e o *Dual-phase,* também chamado de *Water Enhanced*. Com base nessa suposição, será possível avaliar qual técnica é mais viável economicamente, levando em consideração o número de poços necessários para recuperação de LNAPL.

A partir dos dados de entrada do problema, será possível comparar os resultados obtidos no *software* DRL com os resultados alcançado pelo *software* LDRM. Os objetivos específicos deste problema incluem:

a) Verificar a quantidade de LNAPL presente no local de estudo;

b) Identificar quanto do LNAPL pode ser recuperado;

c) Determinar qual a técnica de extração mais viável economicamente para o cenário.

4.2 Levantamento das informações para a simulação no DRL

4.2.1 Identificação da área de estudo

Após criar um Novo Projeto no DRL, foram preenchidas as informações da área de estudo na aba “Identificação da área de estudo” (Figura 4.1). O preenchimento pode ser feito previamente no banco de dados, ou, então, diretamente na interface, selecionando o ícone de localização. Para mais informações, consulte o Item 2.3.2.

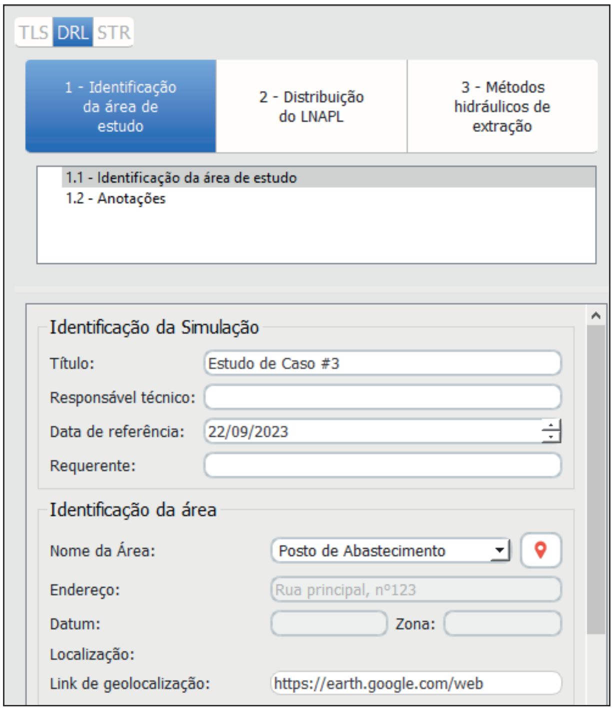


Figura 4.1. Identificação da área de estudo

4.2.2 Metodologia de cálculo para a distribuição de LNAPL

Na aba “Distribuição do LNAPL” deve-se selecionar a metodologia de cálculo para a distribuição do LNAPL (Figura 4.2). O DRL apresenta duas opções de metodologia: o modelo de Lenard, Rayner e Davis (2017) e o modelo de Jeong e Charbeneau (2014). Para esse estudo de caso, foi escolhido o método de Jeong e Charbeneau (2014), que possibilita o cálculo das saturações total, livre e residual do LNAPL, bem como os volumes representados por essas, sem considerar o trapeamento do LNAPL. Essa decisão foi tomada tendo em vista que o cenário em questão não apresenta uma grande variação do nível d’água, logo pode-se considerar que não haverá um grande volume de LNAPL trapeado. A disponibilidade de duas metodologias para o cálculo da distribuição de LNAPL

é uma exclusividade do DRL. No caso do LDRM, somente a metodologia de Jeong e Charbeneau está disponível.

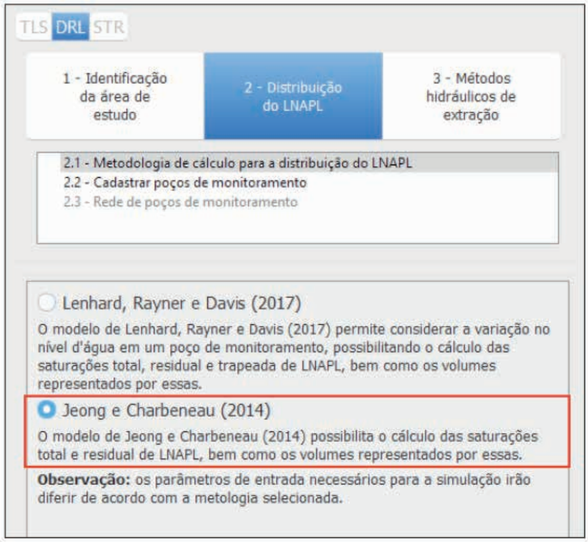


Figura 4.2. Seleção da metodologia de Jeong e Charbeneau (2014)

4.2.3 Cadastrar poços de monitoramento

Em seguida, é necessário cadastrar os poços de monitoramento da área de estudo. Neste exemplo, como são avaliadas duas técnicas de recuperação, optou-se por cadastrar dois poços iguais, chamados “Poço 01” e “Poço 02”, para, posteriormente, avaliar cada técnica de extração de forma separada. O cadastro foi realizado de forma individual, através da interface do DRL (Figura 4.3).

Os poços de monitoramento do local indicaram que a fase livre corresponde a 1 metro de espessura. Para o estudo de caso em questão, considerou-se um único poço para a extração de LNAPL. Contudo, com a finalização do estudo e a análise dos resultados, é possível verificar se há a necessidade de instalação de novos poços de acordo com o tipo de método de extração escolhido. Os parâmetros necessários para o cadastro dos poços de monitoramento são discutidos a seguir (Figura 4.3).

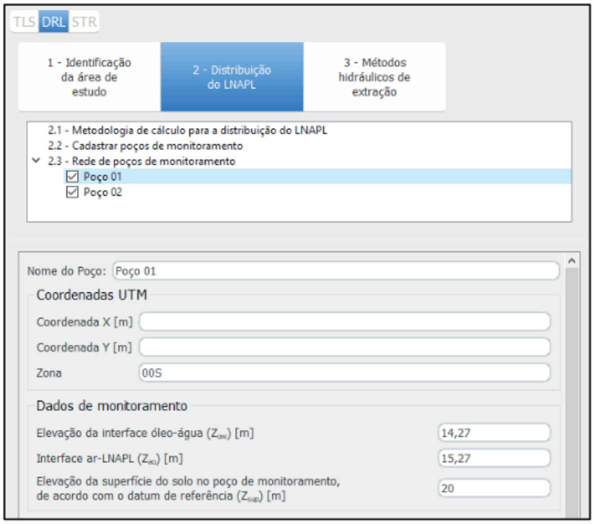


Figura 4.3. Dados de monitoramento inseridos no DRL

- **Coordenadas UTM**

A primeira etapa consiste na inserção das coordenadas UTM dos poços de monitoramento. Visto que neste exemplo não são apresentadas informações sobre as coordenadas, esse campo não foi preenchido. As coordenadas geográficas não são de inserção obrigatória, já que não influenciam diretamente no cálculo da distribuição.

- **Dados de monitoramento**

O exemplo o qual esse estudo segue, traz informações sobre a espessura de LNAPL (b_n) no poço de monitoramento e nível de água fora do poço, ou seja, da interface ar-água (Z_{aw}). Estes são os parâmetros de entrada necessários para o *software* LDRM. Entretanto, na etapa "Dados de Monitoramento" do DRL, as informações que devem ser inseridas consistem apenas em dados que são obtidos diretamente dentro do poço de monitoramento, como a elevação da superfície do solo no poço de monitoramento de acordo com datum de referência (Z_{sup}) e as elevações da interface óleo-água (Z_{ow}) e ar-LNAPL (Z_{ao}). A Figura 4.4 traz a representação das informações que são disponibilizadas pelo estudo (b_n e Z_{aw}) e as informações necessárias ao DRL (Z_{sup} , Z_{ow} e Z_{ao}).

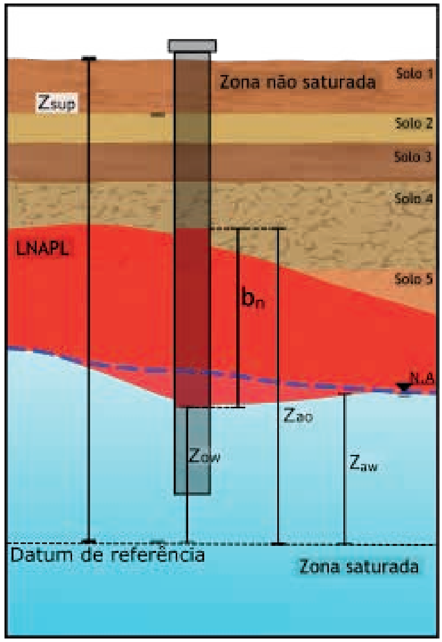


Figura 4.4. Modelo conceitual para Jeong e Charbeneau (2014)

Para possibilitar a simulação no DRL, a interface ar-água (Z_{aw}) precisou ser convertida nas elevações Z_{ow} e Z_{ao}, por meio das equações (1) e (2). Com base nas informações fornecidas pelo exemplo sobre o modelo conceitual do problema, sabe-se que Z_{aw} = 15 m, b_n = 1 m e pr = 0,73 (permeabilidade relativa do LNAPL = densidade do óleo/densidade da água).

$$Z_{ao} - Z_{aw} = (1 - \rho_r)\, b_n \tag{1}$$

$$Z_{ao} - 15 = (1 - 0{,}73)\, 1$$

$$Z_{ao} = (0{,}27) + 15$$

$$Z_{ao} = 15{,}27 \text{ m}$$

$$Z_{aw} - Z_{ow} = \rho_r b_n \tag{2}$$

$$15 - Z_{ow} = 0{,}73 \times 1$$

$$Z_{ow} = 15 - 0{,}73$$

$$Z_{ow} = 14{,}27\, m$$

Os resultados indicam Z_{ow} = 14,27 m e Z_{ao} = 15,27 m. Foi considerado que o datum estava abaixo das elevações e a superfície do poço de monitoramento (Z_{sup}) é igual a 20 metros. Os dados de monitoramento inseridos no DRL podem ser observados na Figura 4.3.

- **Caracterização do contaminante**

O contaminante presente no local foi identificado como gasolina fresca, proveniente do posto de abastecimento. Os dados referentes à caracterização do contaminante foram levantados e previamente inseridos no banco de dados, como demonstrado no Item 2.3.1. Nesta etapa, é necessário a inserção de dados referentes à densidade do fluido, viscosidade dinâmica, tensão interfacial ar-LNAPL e LNAPL-água, conforme demonstrado na Figura 4.5.

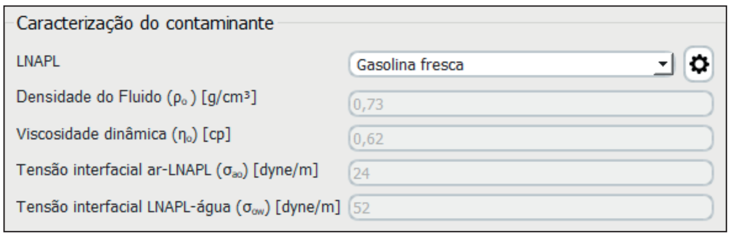


Figura 4.5. Seleção do contaminante

É importante ressaltar que para este caso, visando se adequar ao exemplo apresentado no LDRM, o valor padrão da Tensão interfacial ar-água (σ_{ao}) foi modificado de 72,8 para 70 dyne/cm, na aba Ar e Água do editor de banco de dados, como mostra a Figura 4.6.

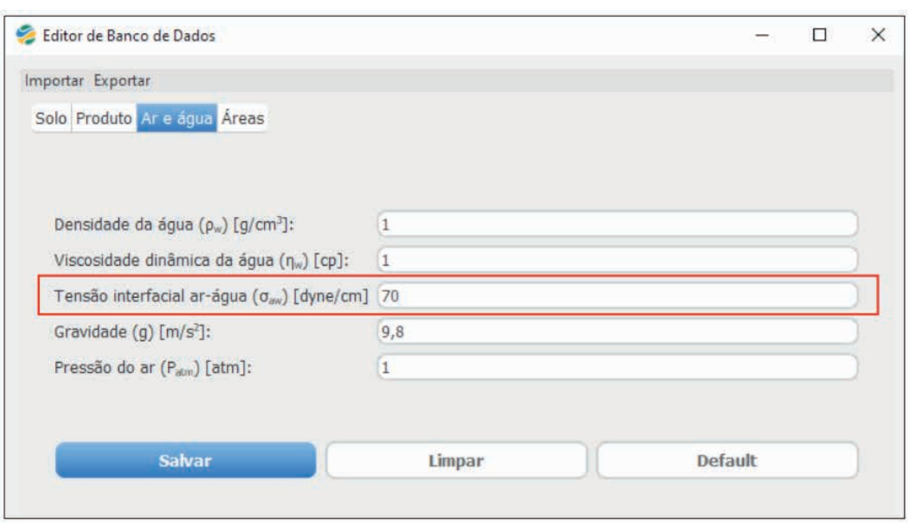


Figura 4.6. Tensão interfacial ar-água

- **Caracterização do meio poroso**

Durante as investigações *in situ*, foi possível constatar que o solo do local possui uma certa homogeneidade, sendo composto por areias de média a alta granulação. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), estes solos são descritos como SW (areia bem graduada com menos de 5% de finos).

Com as investigações, diversas amostras de solo foram coletadas e analisadas. Dessa forma, sabe-se que as maiores saturações de óleo medidas em campo foram de 40% - 42%. Assim, os parâmetros "α" e "n" de van Genuchten devem ser ajustados juntamente com a condutividade hidráulica, até que os picos de saturação correspondam ao observado em campo. Após a verificação desses dados no *software*, chegou-se à conclusão de que os valores finais que melhor satisfazem os dados levantados em campo ocorrem quando α = 4,0 1/m e n = 2,0, enquanto se mantém a condutividade constante a 2,0 m/dia (0,00002325 m/s). Em relação aos dados da porosidade efetiva, pode-se concluir que existe uma variação entre 32% e 46%, sendo selecionado para a entrada do modelo o valor médio (39%).

A saturação residual de água foi obtida por meio do banco de dados de parâmetros da API (2006) ao comparar diferentes amostras de solo, resultando em uma variação de 13% a 45%. O valor máximo obtido (45%) não representa adequadamente o tipo de solo observado, assim, esse valor foi retirado da análise, resultando em uma nova faixa de saturação residual, entre 13% a 29%. Foi selecionado o valor médio (21%) como entrada do modelo. Além disso, durante as investigações, as amostras de solo foram coletadas e submetidas a análises laboratoriais para determinação de hidrocarbonetos totais de petróleo e constituintes voláteis. Com base nas análises das amostras coletadas próximas aos poços, foi verificado que a saturação residual de LNAPL é de, aproximadamente, 15%, próximo à franja capilar e na região do nível de água.

De forma geral, há pouca informação sobre qual modelo de permeabilidade relativa deve ser escolhido, no entanto, Jeong e Charbeneau (2014) recomendam que o modelo de Burdine (1953) seja utilizado em solos mais grossos, como areia; enquanto, o modelo de Mualem (1976) é recomendado para partículas de solos mais finos. Nesse estudo, entretanto, foi selecionado o método de Mualem, visto que os valores calculados para "n" de van Genuchten na base de dados de parâmetros da API (2006) derivam da expressão de Mualem (M = 1 - 1/n).

Com as informações apresentadas acima, é possível preencher os dados de entrada para caracterização do solo no banco de dados. O tipo de solo foi nomeado como "Areia (2)" com a finalidade de se diferir da areia já cadastrada por *default* no banco de dados. Para mais informações sobre o cadastro no banco de dados consulte o Item 2.3.1. Os dados inseridos no DRL são apresentados na Figura 4.7.

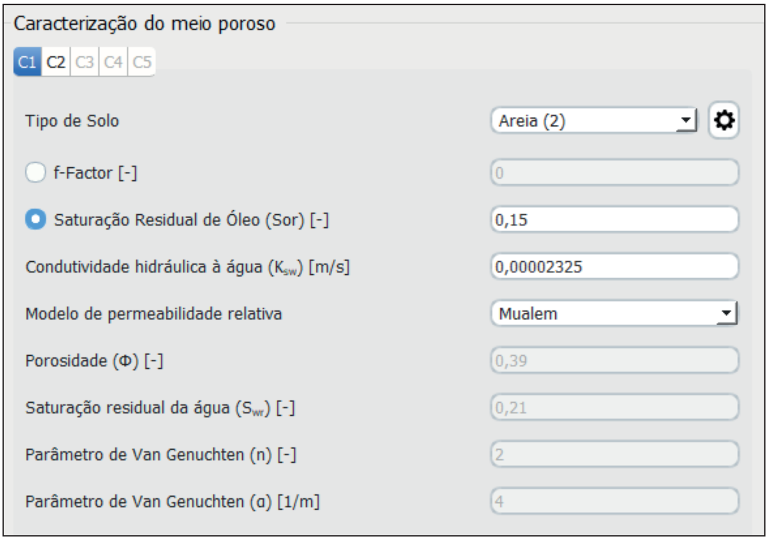


Figura 4.7. Dados de entrada da caracterização do meio poroso

4.2.4 Recuperação de LNAPL

Após levantar e inserir os dados da etapa de distribuição, o usuário deve seguir para a aba de "Métodos hidráulicos de extração", visto que foram analisadas duas técnicas de extração para verificar a mais viável economicamente, para tanto foram selecionados os métodos *Skimming* para o "Poço 01" e *Water Enhanced* para o "Poço 02". Os dados de entrada necessários a cada técnica de extração são discutidos a seguir.

- ***Skimming***

Para esta técnica de extração são necessárias informações sobre o tempo de recuperação, raio de captura e raio do poço de bombeamento. O raio de bombeamento corresponde a 0,06 metros. A informação referente ao raio de captura não é conhecida, porém, de acordo com os valores recomendados por API (2007), que é a base desse estudo de caso, pode-se utilizar raio igual a 3 metros. O valor do tempo de recuperação é um parâmetro inicialmente indeterminado, portanto, nesta etapa, deve-se inserir qualquer número diferente de zero. Os dados utilizados para esta simulação são apresentados na Figura 4.8.

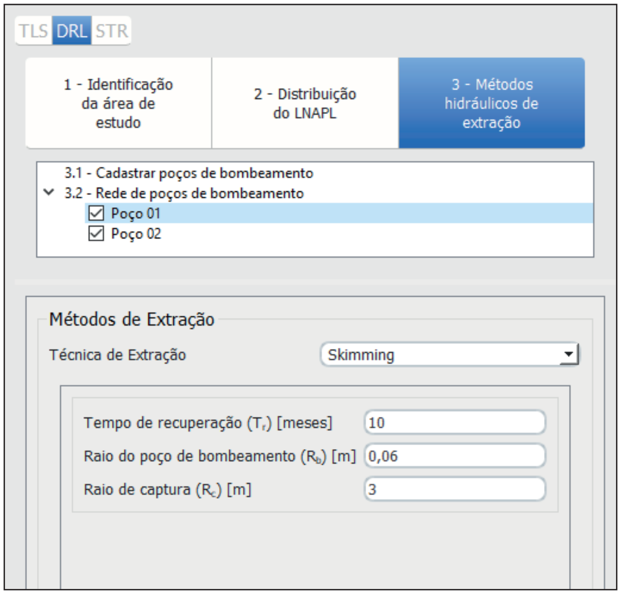


Figura 4.8. Dados de entrada da técnica de extração *Skimming*

- ***Water Enhanced***

O método *Water Enhanced* tem como parâmetros de entrada o tempo de recuperação, a vazão de água, a espessura da zona saturada, o raio do poço de bombeamento, o raio de influência e o raio de captura. Durante o teste piloto, não foi observado um rebaixamento do nível d'água superior a 30 metros do poço de bombeamento, logo, será utilizado esse valor para o raio de influência. O raio de captura não é conhecido, portanto é assumido o valor de 20 metros. O comprimento saturado do filtro do poço apresenta três metros de comprimento, portanto, este valor é usado para definir a espessura da zona saturada. Além disso, o teste piloto de recuperação indicou vazão de 3,8 L/min, que corresponde a 228 L/h. As informações necessárias para a simulação são apresentadas na Figura 4.9.

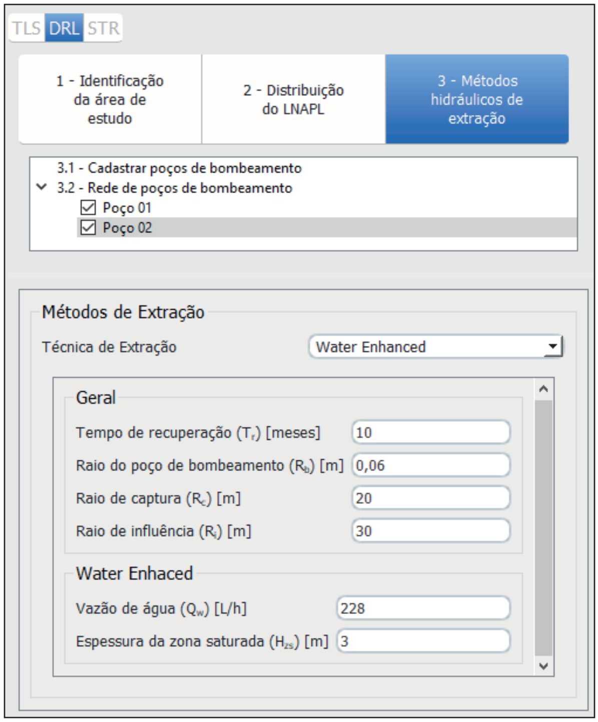


Figura 4.9. Dados de entrada da técnica de extração *Water Enhanced*

4.3 Resultados

Para calcular os resultados da distribuição e recuperação do LNAPL basta clicar no ícone para executar o DRL, selecionar "Recuperação/Distribuição ⟶ Simular todos os poços" (Figura 4.10). A apresentação dos resultados é dada nas abas "Distribuição" e "Recuperação", no lado direito da tela, como mostra a Figura 4.11.

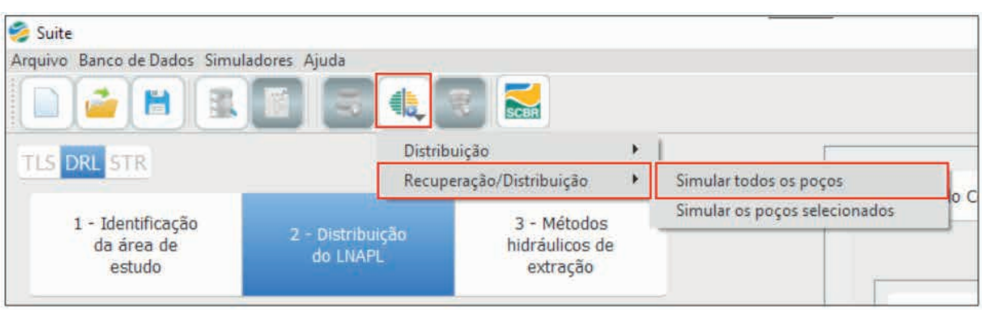


Figura 4.10. Cálculo da recuperação e distribuição de LNAPL

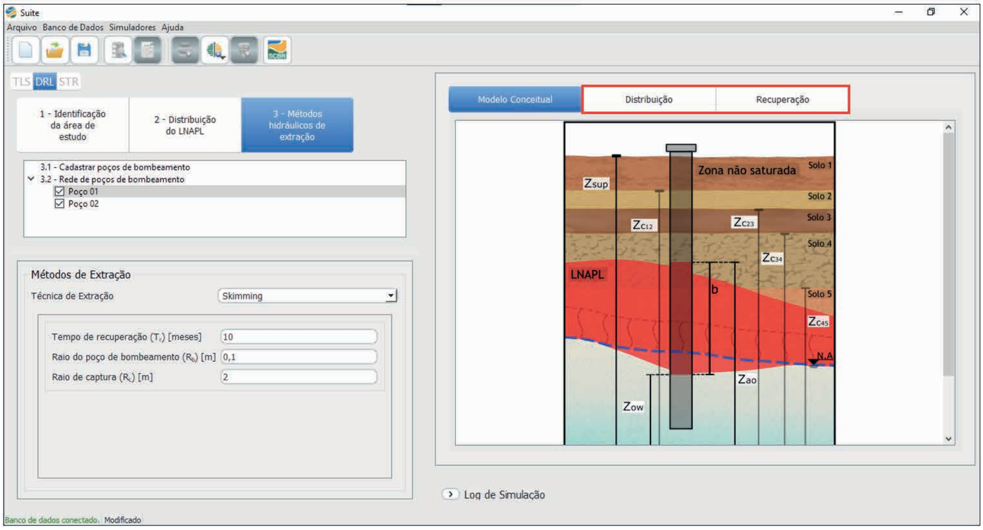


Figura 4.11. Resultados da distribuição e recuperação

4.3.1 Distribuição

Para ambos os poços (Poço 01 e Poço 02), foram utilizados os mesmos dados de entrada na etapa de distribuição, sendo, assim, os resultados das saturações, transmissividade e volume de LNAPL são iguais. Portanto, a seguir são apresentados os resultados do Poço 01.

- **Saturação**

A Figura 4.12 apresenta as curvas de saturação de LNAPL na área de estudo. De acordo com as análises efetuadas em campo, espera-se que as saturações de pico sejam de 40% a 42%. Com a análise do DRL, verificou-se que a saturação total de LNAPL é igual a 42,73%, em conformidade com valor medido em campo.

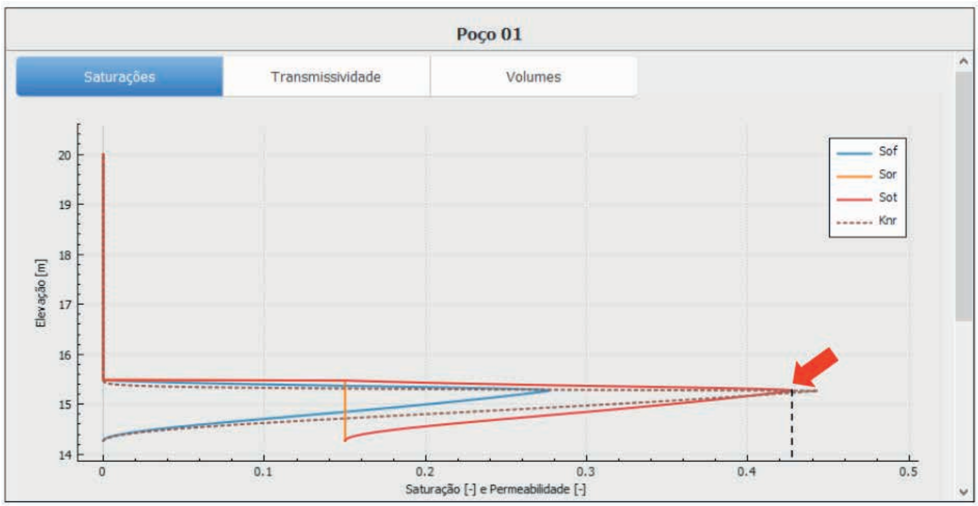


Figura 4.12. Resultados das saturações de LNAPL. S_{of}: saturação livre de LNAPL; S_{or}: saturação residual de LNAPL; S_{ot}: saturação total de LNAPL; K_{nr}: permeabilidade relativa ao LNAPL

- **Transmissividade**

A Figura 4.13 apresenta a curva dos resultados de transmissividade do LNAPL obtidos com o DRL. No exemplo em questão, a transmissividade é igual a 5,71 x 10^{-6} m²/s, quando a espessura de LNAPL é igual a 1 m. Este valor corresponde à capacidade do meio poroso do aquífero de transmitir o LNAPL. Por outro lado, a transmissividade mínima (T_{omin}) representa a menor taxa de transmissão de LNAPL alcançável em sistemas hidráulicos ou pneumáticos segundo dados empíricos levantados pelo ITRC (2018). Portanto, de acordo com o ITRC, se os valores de transmissividade estiverem acima do valor mínimo, ainda é possível reduzi-los até a T_{omin}. Caso contrário, a transmissividade já atingiu o seu menor limite alcançável por uma técnica hidráulica ou pneumática. O LDRM não apresenta resultados de transmissividade.

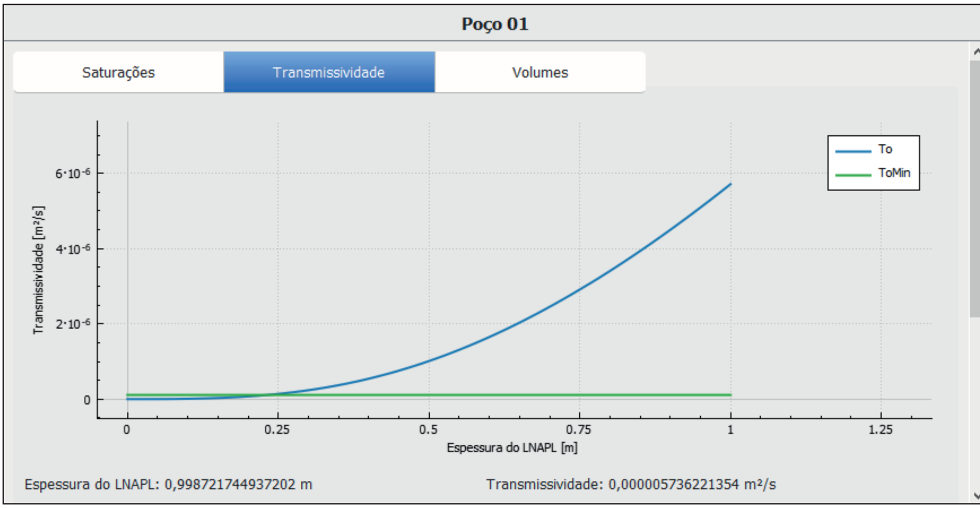


Figura 4.13. Resultado da transmissividade. T_o: transmissividade; T_{omin}: trasmissividade mínima aplicável

- **Volumes de LNAPL**

A Figura 4.14 apresenta a curva dos volumes residual (V_{or}), livre (V_{of}) e total (V_{ot}) de LNAPL obtidos no *software* DRL. Com o LDRM, o volume total específico de LNAPL calculado foi de 0,1312 m³/m², que ao multiplicar pela área de 900 m² onde se encontra o LNAPL, corresponde a 118,08 m³ de produto. Com o DRL, obteve-se um volume total específico de 0,131147 m³/m², que corresponde a 118,03 m³ de produto, estando em conformidade com os resultados do LDRM.

Em relação ao volume de LNAPL recuperável, ou seja, o volume de LNAPL livre, o LDRM apresenta que é possível recuperar 0,0606 m³/m², aproximadamente, 46% de produto. Isso equivale a, aproximadamente, 54,3168 m³ de LNAPL, considerando a área de 900m². Já com o DRL, nota-se que o volume livre corresponde a 0,060605 m³/m², equivalente a 54,54 m³, ou seja, os resultados são compatíveis. O resumo e a comparação dos resultados obtidos na etapa da distribuição de LNAPL com o DRL e LDRM são apresentados na Tabela 4.1.

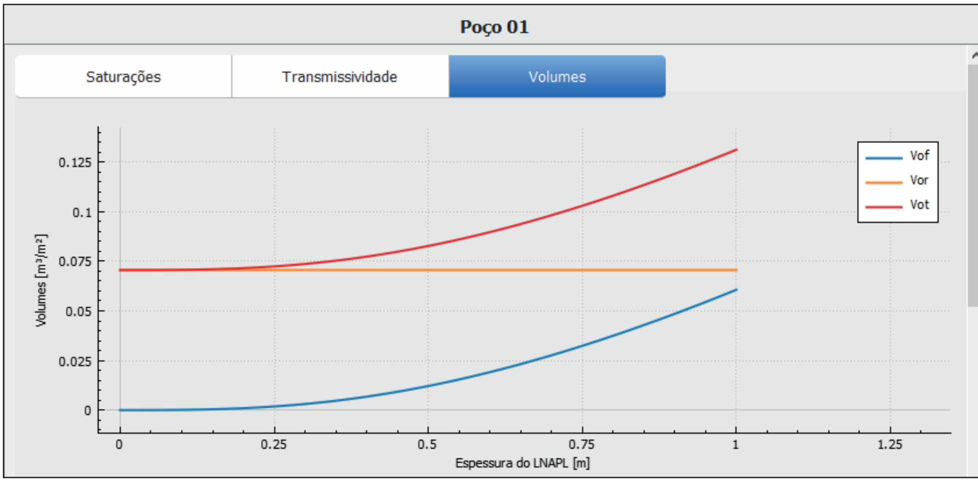


Figura 4.14. Volume livre, total e residual de LNAPL no DRL. V_{of}: volume livre de LNAPL; V_{or}: volume residual de LNAPL; V_{ot}: volume total de LNAPL

Tabela 4.1. Comparação entre o DRL e LDRM para os resultados da Distribuição

Parâmetros	DRL	Manual LDRM (API, 2007)
Saturação total máxima de óleo (-)	42,7%	42%
Volume total de LNAPL (m³)	118,03	118,08
Volume recuperável de LNAPL (m³)	54,54	54,54

4.3.2 Recuperação

A seguir são apresentados os resultados da recuperação de LNAPL com a aplicação dos métodos hidráulicos *Skimming* e *Water Enhanced*. A partir da análise dos resultados, é possível avaliar o volume recuperável, a taxa de recuperação, o tempo de recuperação e a quantidade de poços necessária para atingir o objetivo estabelecido pelo órgão regulador local (remoção de 90% do LNAPL livre, que representa 49,086 m³ de produto). Dessa maneira, é possível avaliar qual técnica é mais viável economicamente.

- **Poço 1 – *Skimming***

Os resultados da técnica *Skimming*, utilizando o *software* DRL, são apresentados na Figura 4.15.

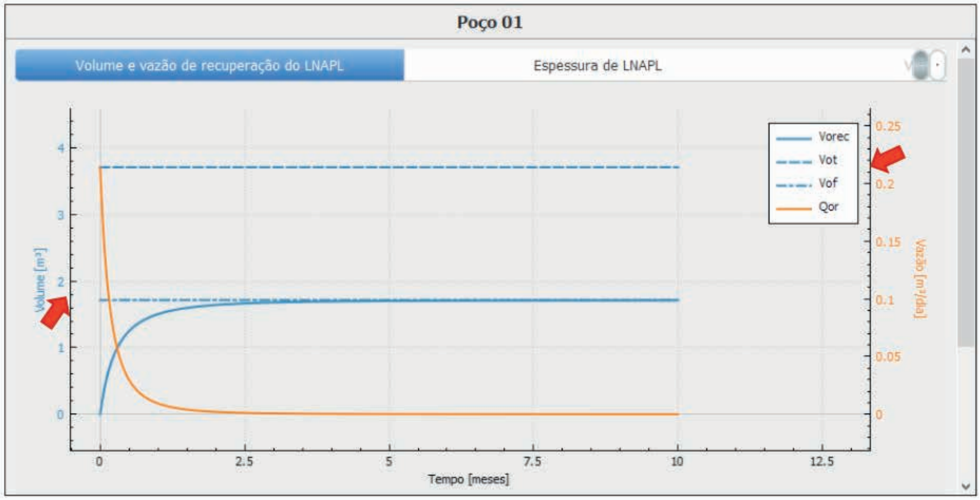


Figura 4.15. Volume recuperado através do método *Skimming,* simulado com o DRL

Conforme observado na Figura 4.15, o volume máximo de LNAPL que pode ser recuperado por um poço de extração com raio de captura igual a 3 metros é de, aproximadamente, 1,71 m³. Deseja-se efetuar a remoção de 90% do LNAPL livre, ou seja, 49,086 m³. Considerando que a área do corpo livre de LNAPL é de 900 m² e que a área de recuperação de cada poço é dada por π3² (28,27 m²), é preciso adicionar 32 poços para que os poços de extração contemplem toda a área de LNAPL. Para recuperar 90% do LNAPL, cada poço de extração deve extrair 1,54 m³ de óleo (90% de 1,71 m³), o que levaria 1,16 meses de atuação simultânea dos poços de extração. Na Figura 4.15 também é possível verificar que a vazão de recuperação inicial obtida pelo DRL foi igual a 0,214 m³/dia ou 214 L/dia.

Os resultados apresentados no manual do LDRM divergem dos resultados obtidos através do *software* DRL. O manual do LDRM traz uma vazão de recuperação inicial de 1,06 L/dia, 77 poços necessários e um tempo de recuperação de 21 anos, ou seja, 252 meses. Com a finalidade de verificar as diferenças encontradas, as simulações apresentadas no manual do LDRM foram refeitas utilizando o próprio *software* do LDRM e aplicando os mesmos dados de entrada apresentados no manual do LDRM. Os resultados apresentados pelo *software* LDRM são condizentes com os gerados pelo DRL, indicando que existe um possível erro no manual do LDRM ao relatar os resultados da simulação. A tabela abaixo apresenta um resumo dos resultados obtidos em cada uma das simulações e os apresentados no manual do LDRM. Para mais informações sobre as simulações e resultados obtidos, consulte o ANEXO A.

Tabela 4.2. Comparação entre os resultados da recuperação com *Skimming,* utilizando os *softwares* DRL, LDRM e Manual do LDRM

Parâmetros	Método de extração – *Skimming*		
	***Software* DRL**	***Software* LDRM**	**Manual LDRM (API, 2007)**
Poços necessários para a recuperação de 49,086m³ de LNAPL	32	32	77
Vazão de recuperação inicial (L/dia)	214	214*	1,06
Tempo de recuperação para 1,54 m³(meses)	1,12	1,14	252
Volume de LNAPL recuperado por poço (m³)	1,71	1,71	NI

*Os resultados do *software* LDRM apontam 0,214 L/d como vazão de recuperação inicial. Entretanto, esse valor não é coerente com as unidades de medida inseridas. Portanto, presume-se que a unidade de medida informada na interface do LDRM (L/d) seja na verdade m³/dia. O mesmo ocorreu na simulação para a técnica *Water Enhanced*, onde na interface do LDRM é indicada a unidade de vazão em L/d (0,615 L/d), enquanto na documentação do manual do LDRM o resultado é apresentado como 610 L/d. NI: Não informado no manual do LDRM (2007).

- **Poço 2 – *Water Enhanced***

Os resultados da técnica *Water Enhanced*, utilizando o *software* DRL, são apresentados na Figura 4.16.

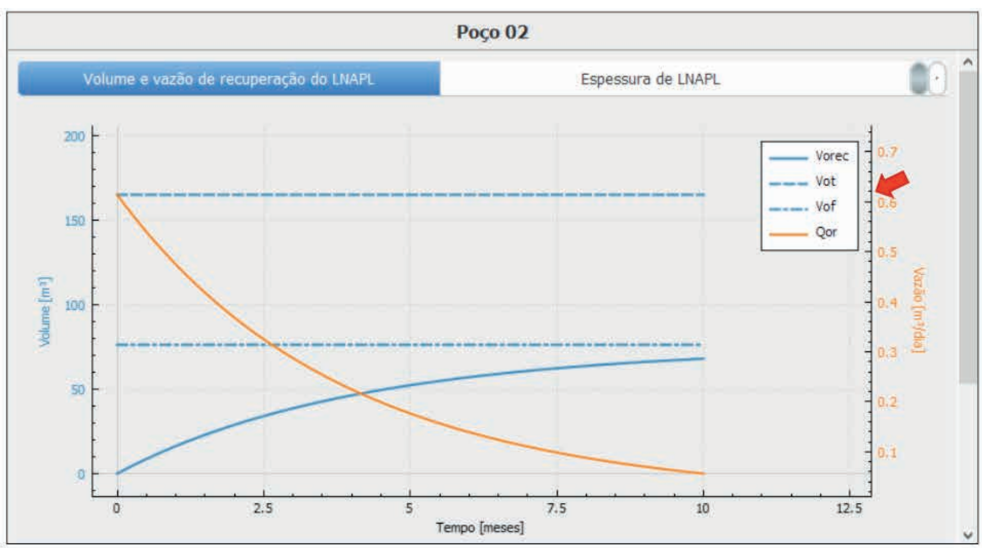


Figura 4.16. Volume recuperado através do método *Water Enhanced* simulado com o DRL

O modelo do LDRM prevê taxas de recuperação inicial com a técnica *Water Enhanced* de 610 L/dia. Observa-se na Figura 4.16 que o valor obtido pelo DRL foi de 613,98 L/dia, ou seja, os resultados são compatíveis.

O raio de recuperação é de 20 metros, o que representa a recuperação de uma área de 1.250 m². A área correspondente ao corpo livre no LNAPL é de 900 m². Dessa forma, é necessário adicionar apenas um poço de extração, visto que a área de recuperação da técnica *Water Enhanced* é maior do que a área que se pretende remediar.

De acordo com a autoridade reguladora, deve-se efetuar a remoção de 90% do LNAPL que pode ser recuperável, o que representa 49,086 m³ de produto. Sendo assim, a adoção de um único poço de extração seria suficiente.

Conforme dados fornecidos pelo manual do LDRM, chegou-se à conclusão que para efetuar a recuperação de 49,086m³ de LNAPL através de *Water Enhanced,* seria necessário um tempo de 4,4 meses. Já no *software* DRL foi verificado que para efetuar a remoção do mesmo volume seriam necessários cerca de 4,49 meses (Figura 4.16). Logo, os resultados do DRL e do LDRM com relação ao tempo de recuperação necessário são compatíveis, conforme demonstrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Comparação entre os resultados da recuperação utilizando *Water Enhanced* com o *software* DRL, LDRM e Manual do LDRM

Parâmetros	*Water Enhanced*	
	DRL	Manual LDRM (API, 2007)
Poços necessários para recuperação de 49,086 m³ de LNAPL	1	1
Vazão de recuperação (L/dia)	614	610
Tempo de recuperação (meses)	4,49	4,40
Volume de LNAPL recuperado por poço (m³)	49,086	NI

NI: Não informado no manual do LDRM (2007).

4.4 Conclusões

A seguir são apresentadas as conclusões referentes a cada objetivo específico do estudo.

a) Verificar a quantidade de LNAPL presente no local de estudo.

Utilizando o DRL foi possível observar através dos gráficos de volume livre, residual e volume total de LNAPL (Figura 4.14) que o volume total de LNAPL é igual a 0,1311 m³/m², quando a espessura de LNAPL é de 1 m. Considerando a área de 900 m² de LNAPL, tem-se 118,03 m³ de volume total de produto. Já com o *software* LDRM, para a área de 900 m² onde se encontra o LNAPL, é possível verificar a existência de 0,1312 m³/m² de volume específico total de LNAPL, o que representa, aproximadamente, 118,08 m³ de produto. Portanto, os resultados do DRL e do LDRM são compatíveis.

b) Identificar quanto do LNAPL pode ser recuperado.

De acordo com o DRL, os resultados indicaram que o volume livre corresponde a 0,0606 m³/m², ou seja, 54,54 m³. Já com LDRM é possível recuperar 0,0606 m³/m² de

produto ou, aproximadamente, 46%, o que equivale a 54,54 m³ de LNAPL, ou seja, ambos são compatíveis.

c) Determinar qual a técnica de extração mais viável economicamente para o cenário.

Para determinar a técnica mais viável economicamente, foi realizada uma análise dos volumes de LNAPL recuperados ao longo do tempo e da quantidade de poços necessários para a sua extração.

Em relação a técnica de *Water Enhanced*, visto que a área de recuperação (1.250 m²) expressa pelo raio de captura de um único poço de extração é maior do que a área que se pretende recuperar (900 m²), conclui-se que será necessário apenas um poço de extração. Além disso, os resultados do DRL mostraram que para recuperar 90% do volume recuperável, ou seja, 49,068 m³ de LNAPL, é necessário um tempo de recuperação de 4,5 meses.

Para a recuperação com a técnica *Skimming*, o DRL indicou que para extrair 90% do volume de LNAPL livre são necessários, aproximadamente, 32 poços de extração, por um período de 1,12 meses.

Portanto, conclui-se que a recuperação por *Water Enhanced* parece ser mais econômica que o *Skimming*, principalmente devido ao número inferior de poços requeridos. O aumento do número de poços acarreta custos mais elevados relacionados à instalação, operação e manutenção dos poços, além de tornar seu monitoramento ainda mais complexo. Entretanto, essa avaliação representa uma forma simplificada de avaliar as vantagens e desvantagens de cada método de extração. Sendo assim, recomenda-se a realização de uma avaliação mais detalhada do cenário, considerando também os custos operacionais e equipamentos já disponíveis na área de interesse. O intuito deste estudo, de modo geral, é demonstrar que, com os resultados obtidos pelo *software* DRL, é possível realizar uma análise comparativa entre as técnicas de extração hidráulicas, também disponibilizando os dados que possibilitam realizar as análises de custo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM)* Volume 2: User and Parameter Selection Guide. API 2007.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Parameters Database*. API 2006.

BURDINE, N.T. Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data. *Journal of Petroleum Technology*, [s.l.], v. 5, n. 03, p.71-78, 1 mar. 1953. Society of Petroleum Engineers (SPE). http://dx.doi.org/10.2118/225-g.

CANADA. *Compare decontamination technologies*. Governo do Canadá, 2019. Disponível em:<https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/techlst.aspx?lang=eng>. Acesso em: 14 dez. 2023.

CHARBENEAU, R. LNAPL *Distribution and Recovery Model (LDRM)*, Volume 2. Regulatory and Scientific Affairs Department. API publication 4760, janeiro 2007.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*, Version 4.0. Dual-Phase Extraction, 2002a. Disponível em:< https://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-37.html>. Acessado em: 14 dez. 2023.

INTERSTATE TECHNOLOGY REGULATORY COUNCIL (ITRC). LNAPL *Site Management:* LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies, LNAPL-3. Washington: ITRC, 2018. Disponível em: <https://lnapl-3.itrcweb.org/appendix-c-transmissivity-tn-appendix/>. Acesso em: 11 dez 2023.

JEONG, J.; CHARBENEAU, R. J. An analytical model for predicting LNAPL distribution and recovery from multi-layered soils. Journal of Contaminant Hydrology, [s.l.], v. 156, p.52-61, jan. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.09.008.

KAHRAMAN, I. *Analysis of a LNAPL Recovery System Using LDRM in a South Texas Facility*. The University of Texas at Austin, agosto 2013.

LENHARD, R.J.; OOSTROM, M.; DANE, J.H. A constitutive model for airNAPL water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, [s.l.], v. 71, n. 1-4, p.261-282, jul. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2003.10.014

LENHARD, R.J.; RAYNER, J.I.; DAVIS, G.B. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*, [s.l.], v. 205, p.1-11, out. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.06.002.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, [s.l.], v. 12, n. 3, p.513-522, jun. 1976. American Geophysical Union (AGU). http://dx.doi.org/10.1029/wr012i003p00513.

NAVAL FACILITIES ENGINEERING SERVICE CENTER (NFESC*). Application Guide for Bioslurping: Volume II: - Principles and Practices of Bioslurping. Port Hueneme*: NFESC, 1998a. Disponível em: <https://clu-in.org/download/techfocus/mpe/Bioslurp-app-guide-V1.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S EPA). *How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A Guide for State Regulators*. U.S EPA, 1996. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-03/documents/fprg.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

ANEXO

ANEXO A. SIMULAÇÃO DE VALIDAÇÃO – DRL E LDRM

Conforme mencionado no Item 4.3.2, foi identificada uma divergência entre os resultados apresentados pelo manual do LDRM e os obtidos com o *software* DRL na recuperação de LNAPL utilizando o método de extração *Skimming*. Portanto, a fim de validar os resultados, foram realizadas novas simulações em ambos os *softwares*, com os mesmos dados de entrada informados pelo manual do LDRM. No LDRM foram realizadas simulações com as duas opções de unidades disponíveis no *software*, unidades inglesas e sistema internacional (SI). Já no DRL, foi realizada apenas uma simulação. Dessa forma, foram obtidas três simulações, identificadas como DRL, LDRM *English* e LDRM SI. Os dados de entrada utilizados nas simulações de distribuição (Figura A.1, Figura A.2 e Figura A.3) e recuperação (Figura A.4, Figura A. 5 e Figura A. 6) são apresentados nas imagens retiradas diretamente de cada *software*.

- **Dados de entrada de distribuição de LNAPL**

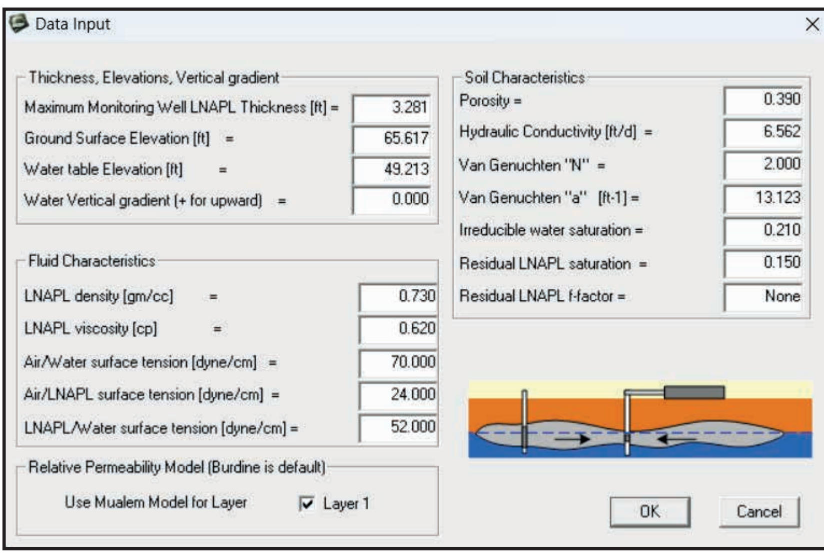


Figura A.1. Dados de entrada da distribuição – LDRM English

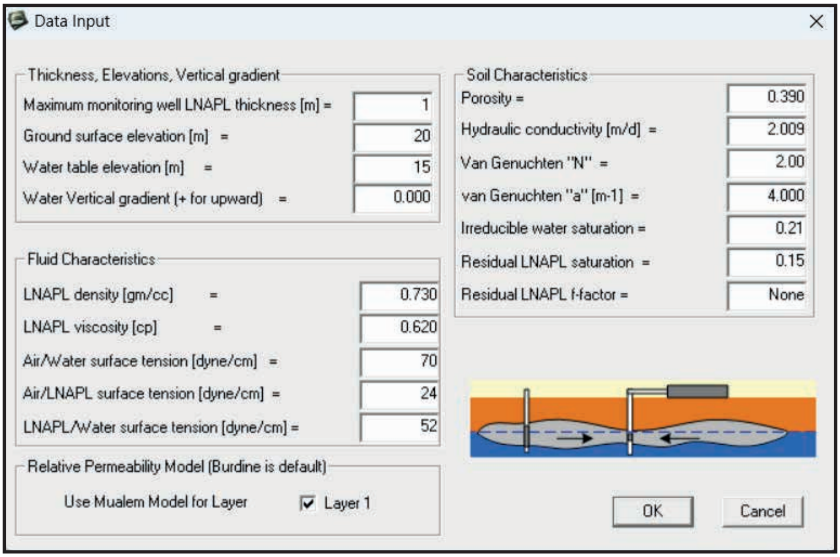


Figura A.2. Dados de entrada da distribuição – LDRM SI

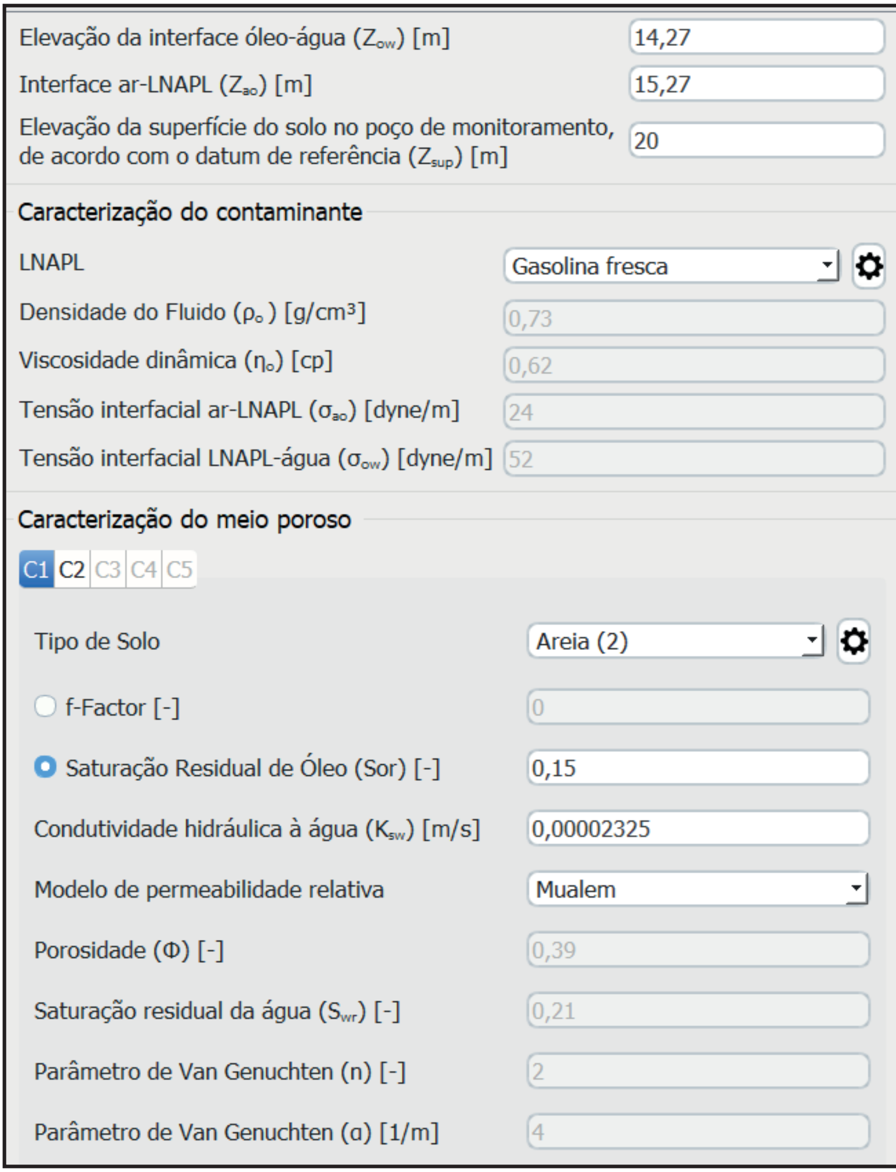


Figura A.3. Dados de entrada da distribuição – DRL

- **Dados de entrada de recuperação de LNAPL**

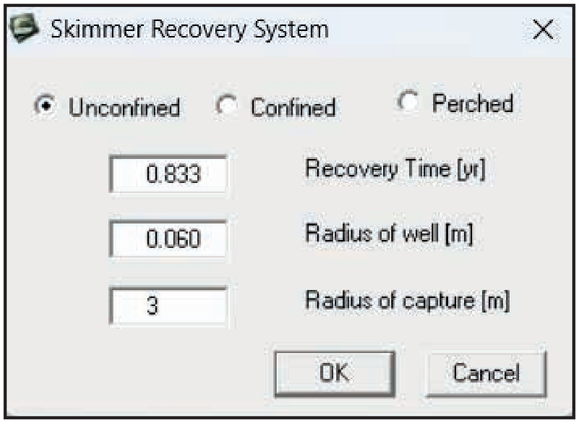


Figura A.4. Dados de entrada da recuperação– LDRM English

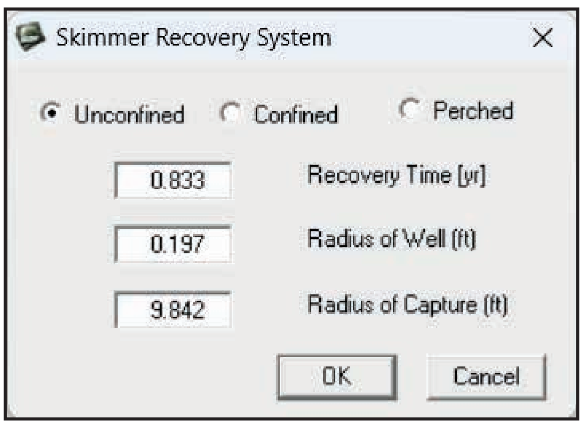


Figura A. 5. Dados de entrada da recuperação – LDRM SI

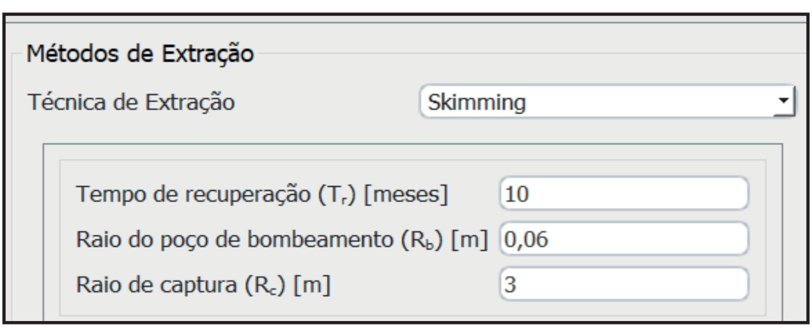


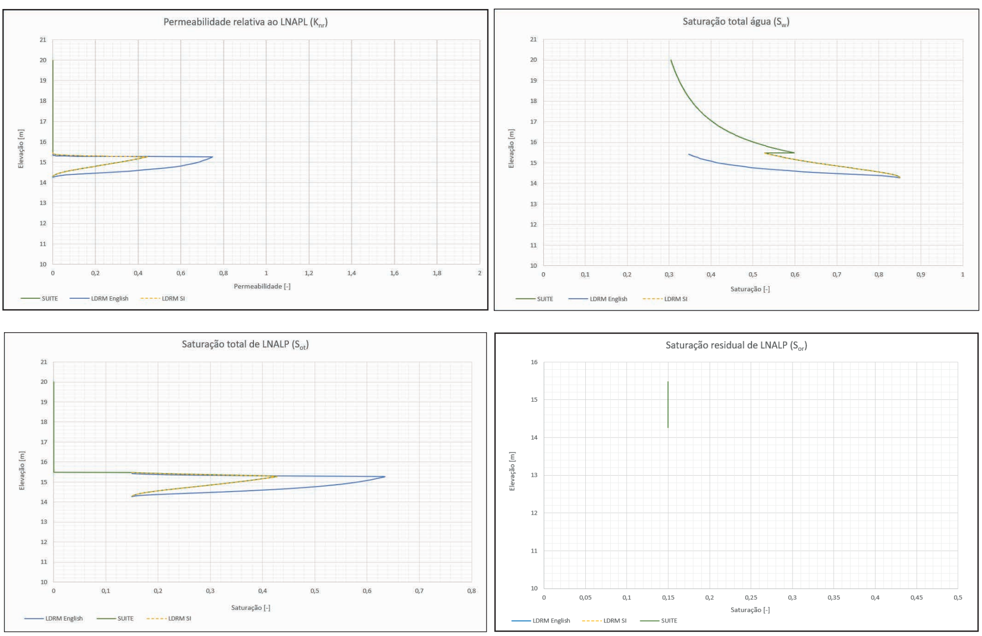
Figura A. 6. Dados de entrada da recuperação– DRL

Para comparar os resultados das três simulações, os parâmetros do LDRM, que não estavam de acordo com o sistema internacional de medidas, foram convertidos para possibilitar a elaboração de gráficos comparativos (Tabela A.1).

A comparação permitiu concluir que os resultados das simulações do LDRM em unidades SI e das simulações com o DRL são condizentes. Isso indica que há um possível erro no manual do LDRM ao relatar os resultados obtidos com a técnica *Skimming*, visto que os resultados apresentados no próprio *software* do LDRM não condizem com os apresentados em seu manual. Por outro lado, os resultados das simulações do LDRM em unidades inglesas apresentam algum erro, pois mesmo após realizar as devidas conversões de unidades, os resultados não são condizentes com as demais simulações.

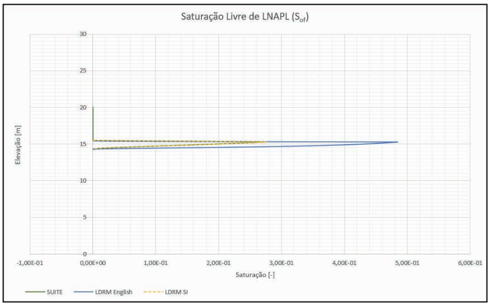
Além disso, ao avaliar os valores gerados para a vazão de recuperação de LNAPL durante as simulações no LDRM SI, percebe-se que a ordem de grandeza apresentada corresponde a unidade de m³/dia, e não a L/d, como indicado na interface do LDRM. Sendo assim, a curva do gráfico referente ao parâmetro de vazão de recuperação para a simulação com o LDRM SI foi plotada com valores extraídos diretamente dos resultados, sem necessidade de conversão.

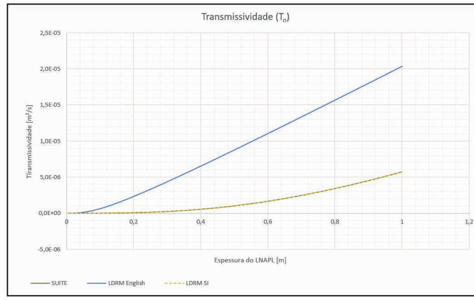
Tabela A.1. Gráficos comparativos das simulações realizadas – Distribuição de LNAPL

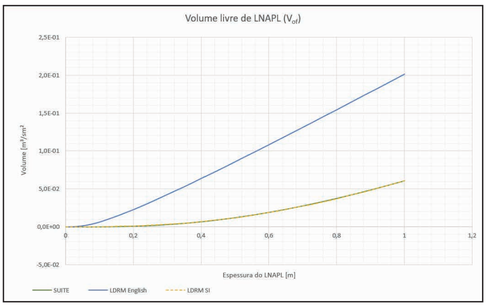


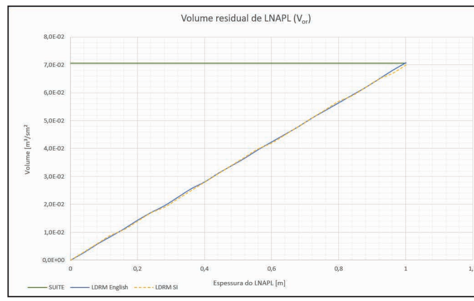
LDRM SI: simulação utilizando o *software* LDRM com unidades no sistema internacional; LDRM English: simulação utilizando o *software* LDRM com unidades inglesas; DRL: Simulação utilizando o *software* DRL

Tabela A.2. Gráficos comparativos das simulações realizadas – Distribuição de LNAPL – *continuação*



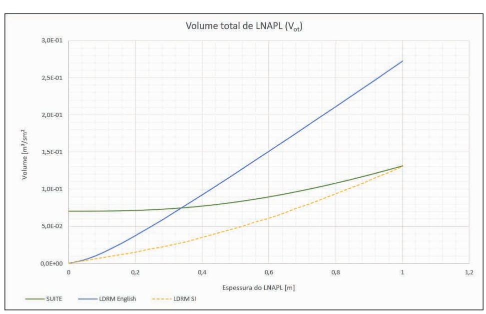






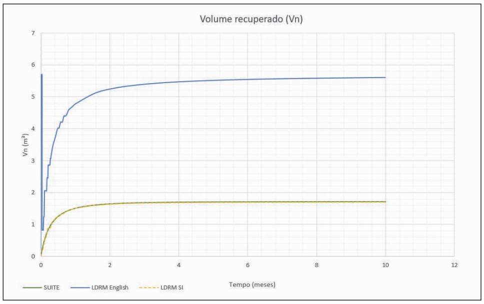
LDRM SI: Simulação utilizando o *software* LDRM com unidades no sistema internacional; LDRM English: simulação utilizando o *software* LDRM com unidades inglesas; DRL: Simulação utilizando o *software* DRL. **Obs.:** A discrepância identificada nos resultados de volume residual de LNAPL ocorre devido ao fato de que, embora uma saturação residual constante (0,15) tenha sido inserida, o *software* LDRM representa os resultados de volume como uma crescente linear, começando com uma saturação residual de 0 e alcançando o volume máximo com base na saturação indicada pelo usuário (0,15). Por outro lado, o DRL representa o resultado como uma linha constante, mantendo um valor sempre igual ao volume residual representativo da saturação inserida como dado de entrada (0,15).

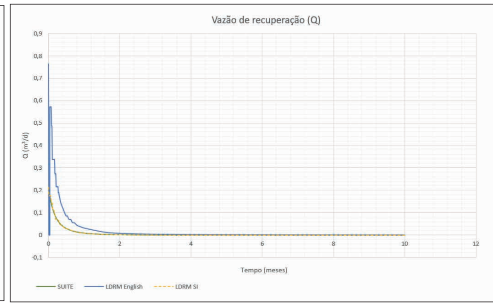
Tabela A.3. Gráficos comparativos das simulações realizadas – Distribuição de LNAPL – *continuação*

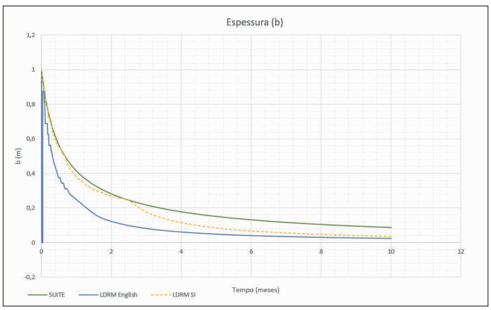


LDRM SI: Simulação utilizando o *software* LDRM com unidades no sistema internacional; LDRM English: simulação utilizando o *software* LDRM com unidades inglesas; DRL: Simulação utilizando o *software* DRL. **Obs.:** A discrepância observada no volume total de LNAPL é uma consequência da discrepância anteriormente identificada no volume residual, uma vez que o volume total é a soma do volume livre com o residual.

Tabela A.4. Gráficos comparativos das simulações realizadas – Recuperação de LNAPL utilizando método de extração *Skimming*







LDRM SI: Simulação utilizando o *software* LDRM com unidades no sistema internacional; LDRM English: simulação utilizando o *software* LDRM com unidades inglesas; DRL: Simulação utilizando o *software* DRL. **Obs.:** No caso da vazão de recuperação de óleo obtida através do LDRM SI, os resultados foram representados sem a conversão da unidade de medida originalmente exibida na interface do LDRM (L/d), uma vez que foi constatado que o *software* expressa o valor da vazão em m³/dia e não em L/d.

Guia do Usuário

DRL

Distribuição e Recuperação de LNAPL

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

PETROBRAS
anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UFSC
rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE
Atena Editora
Ano 2024

Guia do Usuário

DRL

Distribuição e Recuperação de LNAPL

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Ano 2024